



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

STUDIUM TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ  
VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU  
S VLÁKNOVOU VÝZTUŽÍ

THERMAL PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED  
CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kateřina Pecháčková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

BRNO 2018

## Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1150/2017  
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie  
Studentka: **Bc. Kateřina Pecháčková**  
Studijní program: Chemie pro medicínské aplikace  
Studijní obor: Chemie pro medicínské aplikace  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.**  
Akademický rok: 2017/18

### Název diplomové práce:

Tepelné vlastnosti vysokohodnotného betonu s vláknovou výztuží

### Zadání diplomové práce:

1. Pojednejte o základních vlastnostech stavebních materiálů a metodách měření jeho tepelných vlastností.
2. Proměřte tepelné vlastnosti vybraných vzorků vysokohodnotného betonu s vláknovou výztuží slinovaného při různých teplotách.
3. Interpretujte naměřené výsledky a diskutujte je s ohledem na tepelné vlastnosti. Pokuste se sestavit model šíření tepla vybranými materiály
4. Výsledky zpracujte do diplomové práce

### Termín odevzdání diplomové práce: 7.5.2018

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

-----  
Bc. Kateřina Pecháčková  
student(ka)

-----  
prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.  
vedoucí práce

-----  
prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2018

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
děkan

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na studium tepelných vlastností vysokohodnotných betonů s vláknovou výztuží HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete). Dané kompozity jsou založeny na kombinaci ocelových a polymerních vláken. Mezi typické vlastnosti těchto materiálů patří vysoká mechanická pevnost, odolnost vůči vodě a pronikání solí. HPFRC jsou využívány ve stavebnictví především ke konstrukci výškových budov.

Ke studiu termofyzikálních veličin byla využita diferenciální tranzientní metoda. V teoretické části práce byly popsány druhy betonů, jejich výroba a vlastnosti. Dále byly v práci definovány termofyzikální veličiny a metody jejich stanovení (stacionární a tranzientní metody, termická analýza). Cílem práce bylo stanovit tepelné vlastnosti, konkrétně tepelnou a teplotní vodivost a měrnou tepelnou kapacitu. Výsledky diplomové práce mohou odhalit změny ve složení studovaných materiálů a rovněž kritické teploty pro poškození daných materiálů.

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on the study of the thermal properties of high-performance fiber reinforced concrete HPFRC. The composites are based on a combination of steel and polymeric fibers. Typical properties of these materials include high mechanical strength, water resistance and salt penetration. HPFRCs are mainly used in the construction industry to build tall buildings.

The differential transient method was used to study thermophysical variables. The theoretical part of the thesis described the types of concrete, their production, and their properties. Furthermore, thermophysical quantities and methods of their determination (stationary and transient methods, thermal analysis) are defined in the thesis. The aim of the thesis was to determine thermal properties, namely thermal conductivity and specific heat capacity. The results of the thesis can reveal changes in the composition of studied materials as well as critical temperatures for damaging the materials.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tepelné vlastnosti, tranzientní metody, vysokohodnotný beton s vláknovou výztuží

## **KEYWORDS**

Thermal properties, transient methods, High Performance Fiber Reinforced Concrete

PECHÁČKOVÁ, K. *Tepelné vlastnosti vysokohodnotného betonu s vláknovou výztuží*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 49 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Oldřich Zmeškal, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....  
podpis studenta

### *Poděkování:*

*Tímto bych ráda poděkovala za vedení při zpracovávání experimentálních dat, vstřícnost, ochotu, cenné rady a připomínky k diplomové práci prof. Ing. Oldřichu Zmeškalovi, CSc. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Kateřině Valentové za pomoc s měřením dat a s jejich interpretací.*

## OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>7</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Složky betonu .....</b>	<b>8</b>
2.1.1 Kamenivo .....	9
2.1.2 Cement .....	9
2.1.3 Voda .....	9
2.1.4 Přísady .....	10
2.1.5 Příměsi .....	10
<b>2.2 Výroba betonu .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 Druhy betonů .....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Obyčejný beton .....	13
2.3.2 Těžký beton .....	13
2.3.3 Lehký beton .....	13
2.3.4 Vysokohodnotný beton .....	14
2.3.5 Železobeton .....	14
2.3.6 Vláknobeton .....	14
2.3.7 Stříkané betony .....	15
2.3.8 Recyklovaný beton .....	16
<b>2.4 Vlastnosti betonu .....</b>	<b>16</b>
2.4.1 Mechanické vlastnost .....	18
2.4.2 Tepelné vlastnosti betonu .....	19
2.4.3 Vlhkostní vlastnosti .....	20
2.4.4 Elektrické a magnetické vlastnosti .....	20
<b>2.5 Tepelné vlastnosti materiálů .....</b>	<b>20</b>
2.5.1 Tepelná kapacita .....	20
2.5.2 Tepelná vodivost .....	21
2.5.3 Teplotní vodivost .....	22
<b>2.6 Metody studia tepelných vlastností .....</b>	<b>22</b>
2.6.1 Transientní metody .....	22
2.6.2 Termická analýza .....	27
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Studované materiály .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Měřicí aparatura .....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Výkonový zdroj Power Supply – Agilent 6622A .....	32
3.2.2 Nanovolt/microohmmetr – Agilent 34420A .....	32
<b>3.3 Charakterizace vzorků před měřením .....</b>	<b>32</b>
3.3.1 Automatizované měření .....	32
<b>3.4 Stanovení rozdílu teplot .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5 Výpočet parametrů pomocí diferenciální metody .....</b>	<b>34</b>
<b>4 DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>36</b>

4.1 Tepelné vlastnosti HPFRC s obsahem vláken polypropylenu.....	36
4.2 Tepelné vlastnosti HPFRC s příměsí PVA.....	40
5 ZÁVĚR .....	45
6 LITERATURA.....	46
7 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	49

# 1 ÚVOD

Už od pradávna sloužily stavební materiály pro budování přístřešků, chatrčí, později k výstavbě domů, které chránily člověka před vlivy počasí a dodávaly mu pocit bezpečí. K nejstarším stavebním materiálům se řadí hlína, kámen a dřevo. Ty poskytovala příroda. V průběhu vývoje člověk vynalézal kvalitnější stavební materiály, jako jsou pálené cihly, malty, cement, beton, kov, sklo a vápno.

Dnes považujeme beton za jeden z nejvýznamnějších stavebních materiálů. Svým významem se řadí mezi materiály, jakými v minulosti byly raky, kámen, železo, a dřevo. V současnosti se téměř nevyskytují budovy, komunikační stavby, vodní díla, námořní stavby, v nichž by tento materiál nesehrával důležitou úlohu. Vědomosti o výrobě betonu a jeho vlastnostech jsou základem využívání tohoto materiálu a zdokonalování staveb.

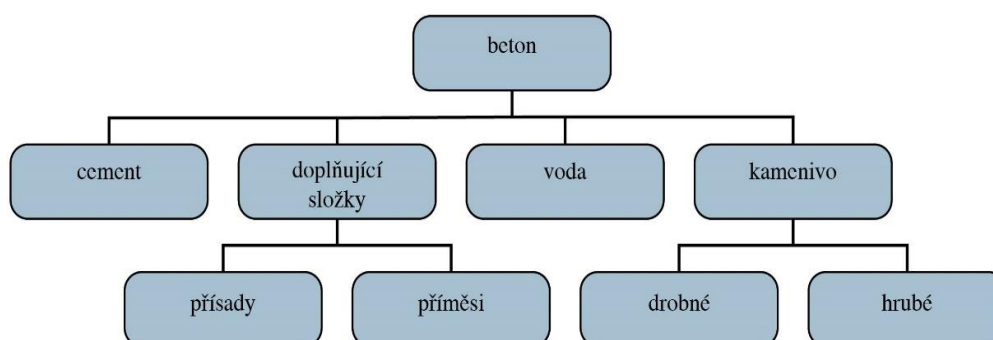
Vysokohodnotný beton s vláknovou výztuží HPFRC překonává nedostatky doposud využívaných materiálů. Efektivita vláken přítomných v materiálu závisí na mnoha faktorech, jako jsou vlastnosti daného vlákna, objem vláken v materiálu, typ nebo orientace vláken. Použití vláken umožňuje výrobu betonu se zvýšenou tahovou, ohybovou a smykovou pevností, houževnatostí, tuhostí a odolností vůči nárazu. Mezi nejčastěji využívaná vlákna patří vlákna oceli, polyvinylalkoholu (PVA) a polypropylenu (PP).

V diplomové práci *Studium tepelných vlastností betonů s vláknovou výztuží* se budeme zabývat stanovením termofyzikálních parametrů prostřednictvím diferenciální tranzientní metody. Získané parametry mohou být přínosem pro charakterizaci zkoumaných materiálů a mohou pomoci v hledání dalších možností jejich praktického využití.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Složky betonu

Na obrázku (Obr. 1) jsou zobrazeny základní složky betonu (kamenivo, cement a voda). Rovněž se do směsi přidávají různé příměsi a přísady. Kvalita a množství jednotlivých složek je důležitá, jelikož ovlivňují konečné vlastnosti betonu [1].



Obr. 1: základní stavební materiály pro výrobu betonu

#### **Modernizace materiálů**

S rozvojem průmyslového, občanského a bytového stavitelství se stal beton jedním z hlavních stavebních materiálů. Během několika desítek let se stále více zvyšuje zájem o vysokopevnostní beton (HSC) a vysokohodnotný beton (HPC) bez vláken v porovnání s běžným betonem (NSC). Velkým přínosem budoucnosti se jeví tzv. vláknobeton. Vložená vlákna eliminují negativní vlastnosti betonu o běžných i vyšších pevnostech. Kombinací obou těchto materiálů vzniká vysokohodnotný beton vyztužený vlákny [2]. Podle druhu a množství vložených vláken jsou vlastnosti těchto materiálů variabilní ve srovnání s obyčejným portlandským cementovým betonem. Obecně příměs vláken pozitivně ovlivňuje fyzikálně mechanické vlastnosti, jako je vysoká pevnost v tlaku, tvárnost, odolnost proti vzniku trhlin, mrazuvzdornost a dlouhá životnost. Vysokohodnotný beton vyztužený vlákny se stal populárním konstrukčním materiálem pro specifické betonové konstrukce, jako jsou např. výškové budovy, mosty, dálniční a železniční tunely a mnoho dalších [3], [4].

Většina konstrukcí je za normálních podmínek vystavena klasickým vlivům prostředí. Při teplotě okolního prostředí setrvávají klasické betonové konstrukce bez problémů. Existují situace, kdy mohou být konstrukce vystaveny vyšším teplotám (při požáru v chemických a metalurgických průmyslových aplikacích, v nichž je beton blízko pecí). U klasických materiálů dochází při vyšších teplotách k odpařování chemicky vázané vody. V důsledku zvýšení teplot vzrůstá vnitřní napětí, které může překonat pevnost materiálu v tahu. Následně dochází působením vodní páry ke vzniku prasklin v materiálu a k jeho odlupování. Tento proces destrukce je nazýván oprýskávání. Konstrukce může při velkém uvolnění energie selhat z důvodu snížení nosnosti. Z toho důvodu se využívají vlákna zvyšující odolnost vůči vysokým teplotám [5], [6].



### 2.1.1 Kamenivo

Ve struktuře betonu zaujímá kamenivo (75 až 80) % objemu a jeho hlavní funkce spočívá ve vytvoření pevné kostry v betonu s minimální mezerovitostí. Z tohoto důvodu obsahuje kamenivo zrna o různých velikostech. Ta jsou součástí tzv. frakce kameniva a míchají se v poměru tak, aby vznikla směs s minimální mezerovitostí. Kameniva se dělí na přírodní nebo umělá. V praxi jsou pro výrobu hutných betonů využívána zejména přírodní kameniva, která se dále dělí podle původu na drcená a těžená. Kamenivo můžeme dělit rovněž podle velikosti největšího zrna v množině zrn, pórovitosti, způsobu těžby a úpravy na těžené a drcené. Zrna vzniklá přirozeným rozpadem hornin mají tvar blízky kouli, jsou hladká a zaoblená. Oproti tomu drcené kamenivo má tvar protáhlý. Je méně vhodné pro výrobu betonu z důvodu drsného povrchu s větší adhezí cementového tmele. Podle velikosti zrn a jejich skladby dělíme kamenivo na hrubé (šterk), drobné (písek) a jemné (moučka). Šterk obsahuje zrna s velikostí od (4–32,5) mm a písek zrna do 4 mm, moučka zrna do 0,25 mm.

Z hlediska technologie zpracování betonu je důležité, aby kamenivo neobsahovalo látky způsobující objemové změny, při styku s cementovým tmelem a kamenem, vedoucí ke změně vnitřního napětí, a tím k porušování struktury betonu. Nepříznivě působí také obsah látek ovlivňujících tuhnutí, tvrdnutí betonu a soudržnost betonu s ocelí. K těmto škodlivým látkám se řadí zejména příměsi jílového a organického původu a také humusovité látky [7], [8].

### 2.1.2 Cement

Cement je prášek, který po smíchání s vodou (poměr 3:1) vytvoří hmotu, která mění svůj tvar a za několik hodin i plasticitu. Jedná se o materiál, který v průběhu několika hodin získává v procesu tuhnutí vlastnosti podobné přírodnímu kameni. Po zatvrdnutí si zachovává svou pevnost a stálost ve vodě. Kvalita cementové matrice závisí hlavně na poměru vody a cementu. U vysokohodnotného betonu je nezbytnou podmínkou pro výrobu menší množství vody vzhledem k cementu. Získáme tím nízký součinitel vody, což chápeme jako předpoklad pro získání matrice s vysokými hodnotami fyzikálně mechanických vlastností.

Existuje mnoho druhů cementu. Ty jsou přidávány do betonů. Základní složkou většiny moderních hydraulických pojiv je portlandský cement. Základem jeho výroby je pálení směsi přírodních nebo průmyslových surovin. Vzniká tak slínek, který se dále mele v kulovém mlýně. Slínek v praxi není používán. Po smíchání s vodou reaguje tak rychle, že beton není možné zpracovat. Z toho důvodu je přidáván k nepomletému slínku síran vápenatý, aby tuhnutí probíhalo tak, jak má.

Všechny další cementy, které se využívají, obsahují vždy určité množství portlandského cementu. Typ cementu závisí tudíž na příměsi, která je k portlandskému cementu přidávána. Tyto příměsi zahrnují přírodní vulkanické pucolány, umělé pucolány, granulovanou vysokopecní strusku, popílky, vápenec [9].

### 2.1.3 Voda

Voda v technologii betonu plní dvě základní funkce. Hlavní funkcí je to, že voda podmiňuje hydrataci cementu, s nímž vytváří v tzv. cementový tmel (kaši) a následně zatvrdlou strukturu

cementového kamene. Na úplnou hydrataci cementu se potřebuje minimálně (23–25) % hmotnosti cementu. Druhá funkce vody je reologická. Voda zajišťuje tvárnost. Kapilárními silami je zajišťována koheze a viskozitou plasticita čerstvého betonu. Voda v ideálním stavu umožňuje transport a hlavně dokonalé zhutnění [7], [8].

#### **2.1.4 Přísady**

Jedná se o chemické sloučeniny, které se přidávají do betonu v množství, které odpovídá asi (0,2–5) % hmotnosti betonu, slouží pro zlepšení a úpravu vlastností. Přísady se dodávají do betonové směsi v průběhu míchání, a to v tekuté nebo práškové formě. Rozlišujeme plastifikační (redukující vodu), superplastifikační (velmi redukující vodu), stabilizační (zadržující vodu), provzdušňující, protizmrazovací (zamezují zmrznutí vody v pórech), plynotvorné, pěnотvorné, odpěňovací, hydrofobizační (odpuzují vodu) typy přísad [9], [10], [11].

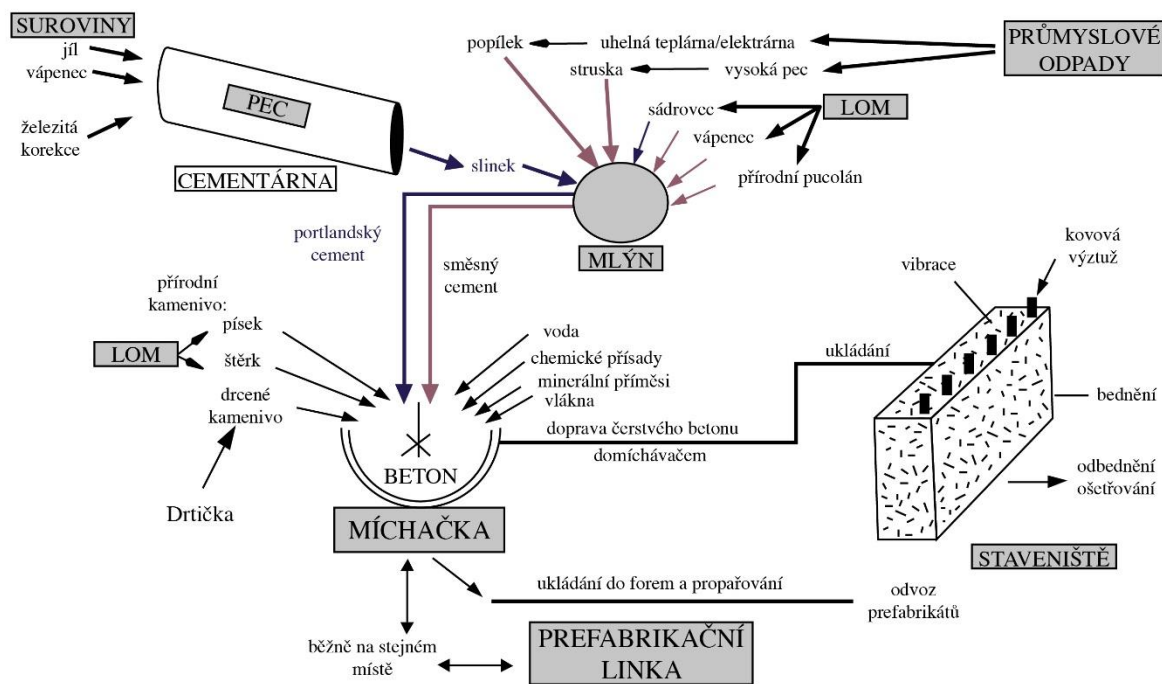
#### **2.1.5 Příměsi**

Jedná se o látky, které se přidávají do betonu pro zlepšení vlastností nebo pro dosažení zvláštních vlastností ve formě prášku. Můžeme je dělit na inertní příměsi (nezasahují do chemických reakcí) nebo na latentně hydraulické látky (zúčastňují se chemických procesů hydratace). Rovněž se k nim řadí barevné pigmenty a organické polymery [9].

### **2.2 Výroba betonu**

Výroba betonu spočívá v dodržování určitých technologických předpisů, které musí zajistit při daném výrobním zařízení a dodaných základních materiálech požadované vlastnosti betonu. Technologický předpis určuje postup dávkování složek, dobu míchání, údaje o způsobu zpracování betonové směsi předepsaným způsobem zhutnění a rovněž předepisuje, jak hotový beton ošetřovat. Uvádí rozsah a způsob kontroly všech vstupních materiálů, přesnosti dávkování a kontrolu kvality již vyrobeného betonu. Zajišťuje, aby při uskladňování a manipulaci betonu nebyly významně změněny jeho vlastnosti. Při běžných provozních podmínkách musí být docílena a udržena požadovaná přesnost dávkovacího zařízení.

Výroba betonu (Obr. 2) se rozděluje na dávkování a míchání betonu, doprava čerstvého betonu, ukládání betonu do bednění, zhutňování, ošetřování čerstvého betonu, urychlování tuhnutí, tvrdnutí betonu a odbednění.



Obr. 2: Schéma výroby betonu: z cementárny až na stavbu

### Dávkování složek betonu

V současnosti se beton vyrábí stroji na stavbách nebo ve výrobnách. Složky mohou být dávkovány objemově nebo hmotnostně. Komponenty hrubé a drobné kamenivo, cement, příměsi a práškové přísady se dávkují hmotnostně, na vahách, které odpovídají požadavkům na přesnost. Kdežto voda, přísady, pórovité kamenivo a tekuté příměsi jsou ve většině případů dávkovány objemově a na nových mísících centrech hmotnostně. Přísady a příměsi se odměřují v procentech vztažených na hmotnost cementu. Dávkování vody je korigováno v závislosti na okamžité vlhkosti kameniva, zejména při jeho volném skladování [9].

### Mísění čerstvého betonu

Čerstvý beton je vyráběn ve výjimečných situacích mísením jeho složek ručně nebo může být mísen v míchačkách. Míchačka zajišťuje stejnoměrné rozložení složek a jednotnou zpracovatelnost betonu po ukončení míchání v požadovaném čase a kapacitě. Při mísení složek v míchačkách, nelze zaručit přesný poměr složek v betonu a tudíž ani kvalitu z důvodu objemového dávkování složek. V současnosti je zcela převládajícím způsobem příprava betonu v mobilních betonárnách. Jedná se už především o automatizovaná zařízení, kde jsou složky dávkovány hmotnostně, čímž se zajistí homogenita.

Při strojním mísení se používají míchačky spádové, s nuceným oběhem materiálu nebo kontinuální. Nejpoužívanějšími jsou míchačky s nuceným oběhem, kde složky betonové směsi se pohybují ve složitých křivkách. Princip je založen na otáčení vodorovného bubnu. Zároveň dochází k otáčení tří lopatek. Nejčastěji se čerstvý beton vyrábí přímo na stavbě nebo v centrálních betonárnách.

### ***Doprava čerstvého betonu***

Podle místa výroby a uskladnění se doprava dělí na primární a sekundární. Primární doprava je doprava již hotového betonu z výroby na staveniště. Hotový produkt se dováží pomocí tzv. autodomíchávače s vestavěným otáčivým bubnem. Směs v bubnu se promíchává lopatkami, čímž se zabráňuje ztrátě homogenity. Sekundární doprava představuje dopravu směsi po staveništi na místo uložení. Pro malé objemy se využívají kolečka, motorové vozíky a pro velké objemy je nejefektivnějším způsobem doprava potrubím. Dopravu zajišťují čerpadla, která dokáží přepravit beton na vzdálenost až 2000 m a výšky 200 m.

### ***Ukládání a zhutňování čerstvého betonu***

Čerstvý beton se ukládá do bednění. Plochy bednění musí být čisté, tvarově přesné, aby nedocházelo ke vzniku přetoků ztvrdlého betonu. Při ukládání by výška padajícího čerstvého betonu neměla překročit 0,5 m, a proto se využívají různé skluzy a hadice.

Pevnost a mnohé další vlastnosti hotového produktu jsou ovlivněny procesem zhutňování, který zabezpečuje co nejhutnější strukturu ztvrdlého betonu. Pevnost špatně zhutněného betonu je až o 40 % nižší v porovnání s betonem dokonale zhutněným. Proces ukládání a zhutňování spočívá v tom, že betonová směs se dává do bednění nebo forem, kde se zhutní a následuje další nezhutněná vrstva a proces se opakuje. Zhutňování se provádí dusáním, vibrací nebo propichováním.

### ***Ošetřování a povrchová ochrana tvrdnoucího betonu***

Po určitý čas od uložení se čerstvý beton ošetřuje a chrání, a to především vůči povětrnostním vlivům (extrémně kladné a záporné teploty), před deštěm, mrazem a dalšími poškozeními. Nejdůležitějším ošetřením je udržování betonu ve vlhkém stavu alespoň do té doby, než dosáhne 70 % krychelné pevnosti. Jedná se o sedm dní, je-li použit portlandský cement a až 14 dní u cementů směsných. S kropením se začíná ihned po zatvrdnutí betonu, aby nedocházelo k vyplavování cementu z jeho povrchu. Celková doba vlhčení se odvíjí od způsobu urychlování, doby tvrdnutí a okolní teploty.

### ***Urychlování tuhnutí a tvrdnutí betonu***

Urychlování tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi je prováděno fyzikálními a chemickými metodami nebo jejich kombinací. V průběhu fyzikální metody se nadbytečná voda z čerstvého betonu odsává. Proces probíhá rychleji při vyšších teplotách betonu. Během prvních pár hodin by teplota betonu neměla překročit 3 °C. Chemické metody urychlují tuhnutí a tvrdnutí betonu aplikací přísad do betonu. Principem je změna rozpustnosti pojiv směsi působením elektrolytů nebo vznik krystalizačních center hydratovaného pojiva pomocí katalyzátorů. Kombinací obou metod se zvyšuje měrný povrch cementu, jemnost a hydratační schopnosti

## ***Odbednění***

Pokud pevnost betonu dosáhla potřebné hodnoty k přenesení zatížení bez deformací, tak konstrukce je považována za připravenou k odbednění. Obecně se rozlišují betonové konstrukce s odbedněním bez průkazu pevnosti a s odbedněním s průkazem pevnosti [11], [12].

## **2.3 Druhy betonů**

Existuje velké množství druhů betonu a rovněž kritérií, podle kterých je dělíme. Přičemž jeden beton může být součástí i několika kategorií. Betony dělíme podle pevnosti na běžný a vysokopevnostní (HSC) beton. Podle způsobu výroby na monolitický nebo prefabrikovaný. Podle objemové hmotnosti na lehký, obyčejný nebo těžký beton. Podle pevnosti a tvaru zkušebního tělesa na krychlenou pevnost a válcovou pevnost betonu. Podle vyztužení na vláknobeton, drátkobeton, železobeton, předpjatý beton, prostý beton (bez výztuže). Podle konečného vzhledu na pohledový, přebarvený, vymývaný, grafický beton a existuje mnoho dalších. Rovněž máme k dispozici betony se speciálními vlastnostmi, jako je samozhutnitelný beton (SCC), vysokohodnotný beton (HPC) nebo vodostavební beton.

### **2.3.1 Obyčejný beton**

Tyto materiály obsahují přírodní kamenivo. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí (2000 až 2600) kg/m<sup>3</sup>. Využívají se k budování podkladních vrstev, základových konstrukcí a jádrových částí přehradních konstrukcí.

### **2.3.2 Těžký beton**

Těžký beton se charakterizuje objemovou hmotností v suchém stavu, která je větší než 2 600 kg/m<sup>3</sup>. Tyto materiály nacházejí svá uplatnění především při stínění rentgenového, radioaktivního záření typu  $\gamma$  a neutronové záření. Pro výrobu těžkého betonu se používá kamenivo o vysoké objemové hmotnosti. Jako plniva se nejčastěji používá limonit, magnetit, fosfor, baryt nebo ocelové odřezky.

### **2.3.3 Lehký beton**

Lehký beton má objemovou hmotnost pohybující se mezi (300–1800) kg/m<sup>3</sup>. Objemová hmotnost je podstatně menší než u běžného betonu, kde se pohybuje v rozmezí (2200–2400) kg/m<sup>3</sup> a je tak vysoká, že vlastní hmotnost betonu představuje velmi významnou část zatížení betonových konstrukcí. Tyto materiály můžeme dělit na betony vylehčené přímo a nepřímo. U přímo vylehčených betonů se přidávají pěnотvorné a plynотvorné přísady do směsi plniva a pojiva. Zatímco u nepřímo vylehčených betonů jsou využívána kameniva o nízké objemové hmotnosti, jako je škvára, křemelina nebo jíl. Při zachování dostatečné pevnosti betonu se konstrukce z tohoto materiálu vyznačují dobrými tepelně izolačními a zvukově izolačními vlastnostmi.

### 2.3.4 Vysokohodnotný beton

Vysokopevnostní betony (HPC) vynikají zejména svou pevností a dalšími vlastnostmi. Hlavním parametrem jsou nejen extrémně vysoké pevnosti umožňující vytvářet velice odolné betonové konstrukce, ale především dlouhá životnost. Ta je dána tím, že receptury betonu jsou odolné proti vlivům prostředí. Životnost konstrukcí se odhaduje na více než 200 let. Svou vysokou pevností jsou předurčeny k uplatnění v oblasti moderní architektury. Nejvyšší řady ultravysokopevnostních betonů (UHPC) přesahují pevnost v tlaku 150 MPa.

#### *Chování vysokohodnotného betonu při požáru*

Použitím superplastifikátorů (snižují vodní součinitel) společně s minerálními příměsemi se dosahuje růstu pevnosti nad 80 MPa. Dochází tím ke vzniku velmi kompaktní mikrostruktury betonu, redukuje se kapilární pórovitost a zlepšuje se soudržnost mezi zrny kameniva a ztvrdlou cementovou pastou. U vysokohodnotného betonu zabraňuje hutná mikrostruktura při požáru úniku páry, která vzniká odpařováním volné vody, a je uzavřena v cementové matici. Při teplotách vyšších, jak 600 °C vzrůstá tlak páry natolik, že dochází k odstřelování kousků betonu. Je-li vystaven žáru vysokopevnostní beton s pevností nad 100 MPa, tlak páry je vyšší než u betonu s pevností 80 MPa. K odprýskávání dochází již při teplotách nad 250 °C a k celkové destrukci již při 400 °C.

### 2.3.5 Železobeton

Železobetonem jsou nazývány betonové konstrukce, do nichž se vkládají různé ocelové prvky. Ocel se do betonu dává pro zlepšení pevnosti v tahu. Tyto konstrukce jsou známy svou dlouhou historií a v praxi se běžně navrhují. V současné době je většina konstrukcí ze železobetonu. Tento beton se využívá z důvodu, že prostý beton stejně jako přírodní kámen má malou pevnost v tahu. Vložením výztuže se konstrukce zesílí zejména v tahové zóně.

Železobeton může fungovat pouze za určitých technických předpokladů. Velké tahové síly lze přenášet jen, je-li dobrá přídržnost mezi ocelí a betonem. Aby tepelné změny neovlivňovaly chování únosnosti, součinitel tepelné roztažnosti betonu a oceli musí být přibližně stejný. Beton musí pro ocel vytvářet vynikající korozní ochranu.

### 2.3.6 Vláknobeton

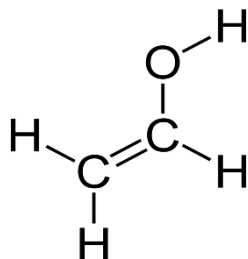
Při výrobě těchto speciálních konstrukčních betonů jsou k běžným složkám přidávána vlákna plnící funkci rozptýlené výztuže. Použití vláken je nejlepším způsobem, jak se vyhnout trhlinám, které vznikají díky tahovému napětí a jejich růstu. Napětí je nejčastěji vyvoláno plastickým smrštěním, vysycháním nebo autogenním smrštěním. Použitím vláken mohou být rovněž vylepšeny vlastnosti, jako nárazová pevnost nebo odolnost vůči abrazi. Vláknobetonu jsou charakterizována podle čtyř kritérií, kterými jsou chemické složení, poměr délek a průměru, tvar vlákna a obsah vláken v betonu.

Typ vláken volíme podle oblasti použití vláknobetonu. Můžeme se setkat s polymerními mikrovláknami, polymerními makrovláknami, kokovými vláknami a konstrukčními vláknami. Polymerní mikrovláknata se využívají k potlačení vzniku mikrotrhlin nebo k jejich redukci. Tyto trhliny

vznikají při plastickém smrštění, které nastává na povrchu čerstvého betonu, pokud je vystaven teplu, větru a voda se odpařuje vyšší rychlostí než je 1 kg/m<sup>2</sup>.hod. Polymerní vlákna nepravidelného tvaru jsou využívána pro zlepšení soudržnosti cementové pasty a polymeru. Jedná se o vlákna větších rozměrů (průměr asi 10 μm). Využívají se k zastavení růstu makrotrhlin vznikajících v důsledku smrštění vysycháním. Vlákna kovová jsou využívána k zvýšení tažnosti a rázové pevnosti vyztuženého betonu. Konstrukční vlákna zvyšují modul pružnosti.

### ***PVA vlákna***

Polyvinylalkoholová vlákna působí v maltách a betonech podobně, jako vlákna ocelová. Důvodem je vysoká tahová pevnost a modul pružnosti, které jsou vyšší než u běžného betonu. Další výhodou PVA vláken představuje přítomnost OH skupin, které vláknům dodávají unikátní soudržnost s cementovou matricí, a proto při namáhání vlákna v matrici výborně drží.



*Obr. 3: Struktura molekuly polyvinylalkoholu*

Mezi typické charakteristiky PVA vláken patří, tahová pevnost (800–1600) MPa, průtažnost (6–10) %, modul pružnosti v tahu (25–40) GPa, délka (6–30) mm a průměr PVA vláken (0,01 až 0,40) mm. Použitím vláken v množství 1,5 % na hmotnost betonu se dá zamezit vzniku trhlin vzniklých v důsledku plastického smrštění, smrštění vysycháním, autogenním smrštěním nebo odprýskáváním.

### **2.3.7 Stříkané betony**

Stříkané betony neboli torkrety se stříkají pod tlakem na podklad. Výhodou těchto betonů je všestrannost. Může být použit na každý druh podkladů, jako je zemina, skála, ocel, starý beton, zdivo z cihel nebo kamenů, umožňuje zhotovení všech typů konstrukcí. Může být použit tam, kde se při ukládání betonu předpokládají potíže (stropy, klenby, svislé plochy). Technologie stříkání betonu může probíhat buď suchým, nebo mokřím způsobem. Při suchém způsobu stříkání betonu jsou složky betonu smíchávány v přesném poměru. Poté se vzniklá směs dopravuje tlakovým vzduchem do trysky, kde se smíchá s vodou a stříká se na podklad.

Mokřím způsob stříkání se vyznačuje tím, že všechny složky i voda se přesně dávkuje a smíchají. Vzniklá směs se vytlačuje k hubici a tlakovým vzduchem se stříká na podklad. Pro vylepšení kvality stříkaného betonu jsou používány materiály, jako minerální příměsi, vlákna a chemické přísady (regulátory tuhnutí, superplastifikátory).

### 2.3.8 Recyklovaný beton

Z důvodu zachování zdroje surovin se používá recyklovaný beton. Problém recyklace materiálů má životní důležitost pro rozvoj a životní prostředí. Z toho důvodu jsou využívány popílký, křemičité úlety a rovněž vysokopecní struska. Dané odpadní suroviny pocházejí z různých odvětví průmyslu, než je výroba cementu a betonu. Používání těchto surovin v betonové směsi přináší dvě hlavní výhody. V zemích jako je Belgie a Holandsko, kde je prostor pro stavbu nových objektů omezen, šetří životní prostředí. Další výhodou je, že se odpad recykluje na kamenivo v místech, kde je ho nedostatek. Použití recyklovaného kameniva pro nové betony nebo pro podkladní vrstvy v silničním stavitelství má zásadní důležitost, jelikož chrání přírodní zdroje a eliminuje potřebu skládek (Tabulka. 1).

*Tabulka. 1: Recyklace konstrukcí a demolic v evropských zemích*

<b>Země</b>	<b>Recyklace z konstrukcí a demolic (10<sup>6</sup> tun)</b>	<b>Recyklovaný materiál (%)</b>
Německo	59	7
Velká Británie	30	45
Francie	24	15
Itálie	20	9
Španělsko	13	5
Holandsko	11	90
Belgie	7	87

Recyklace betonu je jednoduchý proces. Skládá se z následujících kroků – výběr odpadu, podrcení bloků betonu, odstranění kontaminujících produktů, smíchání s přírodním kamenivem a jeho rozdělení do materiálu o specifických velikostech a vlastnostech. Kvalita betonu se odvíjí od kvality materiálu, který byl použit k recyklaci. Za důležitý faktor považujeme původ použitého materiálu. Rozhodující je, zda se jedná o betonovou konstrukci nebo demolici celé budovy, kdy jsou v materiálu i cihly a další odpady [9], [13], [14].

### 2.4 Vlastnosti betonu

Podle společných znaků se vlastnosti betonu dělí do čtyř skupin. Rozlišujeme mechanické vlastnosti, jako pevnost betonu v tlaku, příčném tahu, v tahu ohybem nebo ve smyku. Dále známe deformační vlastnosti, tj. vlastnosti související s působením vnějších sil, se změnou objemu nebo s působením vnitřních sil. Permeabilita betonu popisuje pohyb media nebo toku energie (tepelná a elektrická vodivost, vodotěsnost). Trvanlivost betonu souvisí s odolností proti vlivu prostředí, chemickým látkám a působení vnějších sil (mrazuvzdornost, ohnivzdornost).

V technologii betonu musí být dodržovány 4 základní zásady. Vlastnosti betonu mají empirický charakter, a proto zjištěné parametry jsou podmíněny zkušební metodou. Znamená to, že pokud zkoušky jsou prováděny na jiných zkušebních tělesech, jinými postupy nebo



v jiném prostředí jsou výsledky různé. Nezapomínáme ani na stochastický charakter materiálu. Získané výsledky se posuzují pomocí matematické statistiky z nahodile vybraných vzorků. Vzorky musí být minimálně tři. Důležitým je rovněž to, že na jednom vzorku nelze vícekrát zkoušet jednu nebo více vlastností. V neposlední řadě chápeme vlastnosti betonu jako funkci času. Veličiny charakterizující vlastnosti betonů souvisí se stářím betonu.

Pro vlastnosti betonu je rozhodující cementový kámen. Pórovitá struktura cementového kamene souvisí s tím, že během tvrdnutí a zatěžování v něm vznikají rozdílná napětí a zapříčiňují vznik trhlin. Proto veškeré informace o vlastnostech vychází ze znalostí pórovité struktury cementového kamene a z mikromechaniky.

### ***Pórovitost betonu***

Jedná se o důležitou vlastnost ovlivňující pevnost betonu, modul pružnosti, permeabilitu a trvanlivost. Pórovitost charakterizujeme tvarem pórů, velikostí, distribucí pórů a celkovou pórovitostí  $P_{ck}$ , která je dána rovnicí

$$P_{ck} = 1 - \frac{\rho_{ck}}{\rho}, \quad (1)$$

kde  $\rho$  je hustota (měrná hmotnost) cementového kamene a  $\rho_{ck}$  je objemová hmotnost (včetně pórů) v  $\text{kg/m}^3$ . Tvar pórů souvisí s průchodem kapaliny a plynů pórovitým prostředím. Známe otevřené průchodné póry, otevřené neprůchodné póry a uzavřené póry. Dále rozdělujeme póry podle vzniku, vlivu na vlastnosti cementového kamene. Je známo pět druhů pórů:

- Póry vznikající v důsledku nedokonalého zhutnění betonové směsi a následného nedokonalého vypuzení zachyceného vzduchu z betonu. Tím vznikají kaverny (makrodutiny);
- póry, které jsou přítomny v lehkém kamenivu. Způsobují růst tepelně izolačních vlastností betonu a rovněž pokles jeho mechanických vlastností;
- póry vznikající důsledkem používání provzdušňovacích přísad. Vzniklé póry připomínají bubliny, které lze pozorovat optickým mikroskopem;
- kapilární póry, které vznikají mezi zrny hydratujícího cementu. Výskyt je závislý na vodním součiniteli a na stupni hydratace;
- gelové póry, které se vyskytují uvnitř pevných hydrátů.

### ***Mikromechanika betonu***

Mikromechanika hledá zdůvodnění pevnosti materiálu v závislosti na jeho struktuře. Cementový kámen je křehká a pórovitá látka závislá na množství a distribuci pórů, ale zároveň na množství a velikosti trhlinek. Trhliny vznikají tím, že napětí překročí mez pevnosti tuhé látky v daném místě. Jejich velikost se pohybuje řádově v rozmezí kolem  $1\mu\text{m}$ , přesto jedna vhodně orientovaná trhlina může snížit pevnost látky. Překročí-li napětí ve kterémkoliv místě tělesa kritickou hodnotu, dochází k destrukci (lomu). Lom začíná v místě destrukce, dále se šíří ve stádiích nukleace, rozšiřování trhliny a následně dochází k lomu.

## 2.4.1 Mechanické vlastnost

### *Pevnost betonu*

Hlavním kritériem posuzování betonu je pevnost. Pevnost se obecně posuzuje jako schopnost vzdorovat vzniklým napětím. Pevnost se označuje jako mezní napětí, při kterém dochází ke zlomu neboli globálnímu porušení soudržnosti. Zatížením je většina konstrukcí namáhána kombinací tlakových, tahových a smykových napětí. V konstrukci se vytvářejí různě velká a různě lokalizovaná napětí. Hlavní napětí vzniká v určitém místě konstrukce. Je-li překročena mez pevnosti betonu některou z hlavních napětí, nastane porušení soudržnosti. Pokud vznikne lokální porušení, které nezasahuje celý průřez, vzniká pouze trhlinka. Nastane-li porušení v celém průřezu, nastává destrukce celé konstrukce. Podle statického působení zatížení rozeznáváme pevnosti betonu, jako pevnost v tlaku, pevnost v tahu a pevnost ve smyku.

### *Deformace betonu*

Působením vnějších sil, vlivem teplotních nebo jiných objemových změn vzniká napětí v materiálu, které souvisí s deformačními vlastnostmi. Působení těchto sil vyvolává ve všech látkách změny vzdáleností mezi strukturálními částicemi a u pevných látek změnu struktury. Vlivem těchto dějů mění pevná tělesa svůj tvar, tím i objem a dochází k deformaci. Změny rozměrů tělesa se vyjadřují prostřednictvím poměrných deformací, jako je poměrné prodloužení, poměrné posunutí a zkroucení. Jestliže při odlehčení materiálu vymizí deformace, jedná se o reversibilní (vratnou) deformaci. Schopnost nabytí původního tvaru se nazývá pružnost. Pokud dané deformace po odlehčení tělesa přetrvávají, jedná se o deformaci ireversibilní (nevratnou). Deformace mohou být rozlišovány podle času na okamžité nebo zpožděné. Okamžitá deformace se projevuje ihned po vzniku napětí a po jeho zániku mizí. Zpožděná deformace postupně narůstá po zavedení napětí a po jeho zrušení dochází k postupnému zmenšování deformací s časem.

- Teplotní roztažnost betonu = Při zvyšování teploty dochází k nárůstu energie molekul. Tato energie souvisí se změnou pohybu molekul a s nárůstem objemu dané látky.
- Dotvarování betonu = Jsou to změny (objemu, tvaru) vyvolané dlouhodobým zatížením betonu.
- Smršťování betonu = Kapilární síly způsobují smršťování cementového kamene a současně i stlačování zrn kameniva. Smršťování ovlivňují technologické faktory – pórovitost, druh a vlastnosti cementového kamene, složení betonu, vnější podmínky a čas.

### *Trvanlivost betonu*

Trvanlivost závisí na době působení fyzikálních a chemických vlivů. Je to relativní a časově omezený pojem. Spadají zde děje, které vedou k rozrušování betonu chemickými pochody nebo fyzikálními vlivy. Hovoříme především o korozi betonu. Korozní procesy vyvolávají v betonu, na jeho povrchu nebo na povrchu ocelové výztuže závady (lom, odprýskávání, trhlinky apod.). Tyto závady jsou vyvolávány chemickými vlivy (roztoky solí a kyselin aj.), fyzikálními pochody (vysoké a nízké teploty, mechanický otěr aj.) a biologickým působením

organizmů (mikroorganismy). Vlastnosti betonu a betonové konstrukce ovlivňují intenzitu působení těchto vlivů. V betonu se vyskytují trhlinky, vznikající tam, kde napětí lokálních mikrostruktur betonu přeskočilo pevnost betonu. Tyto deformace zvyšují rychlost působení agresivního prostředí.

- Mrazuvzdornost betonu

Beton ve vodou nasyceném stavu je schopen odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování. V betonu se nachází kapiláry, v nichž voda tuhne při teplotách – 0,5 °C. Zpočátku tuhne led na povrchu betonu a podle rychlosti ochlazování se dostává až do středu. Protože má led větší objem než voda, vyvolává objemový nárůst.

- Vodotěsnost betonu

Propustnost vody závisí na objemu, distribuci makropórů a kapilár v cementovém kameni. Jelikož mikropóry neumožňují průchod vody, jsou rozhodující kapiláry velikosti větší než  $10^{-7}$  m, jimiž voda prochází působením gradientu tlaku. Vodotěsnost se vyjadřuje součinitelem propustnosti  $k_p$ . Obecně platí, že čím je beton starší, tím se více se kapiláry zaplňují hydratovanými slinkovými minerály, a tím vzrůstá vodotěsnost.

### ***Chemická koroze betonu***

Korozi betonu způsobují kyselé agencie podle jejich koncentrace a skupenství. Složení betonu by se mělo navrhovat podle stupně agresivity podle normy ČSN EN 206-1. Porušení konstrukcí je vyvoláváno z důvodu koroze výztuže, síranové koroze cementové matrice, vlivem napadení povrchu betonu agresivními vodami, erozí povrchu betonu nebo alkalicko-křemičitými reakcemi. Beton o vhodném složení atd. je tak dlouho trvanlivý, dokud nedojde ke spojení kapilárních pórů s mikrotrhlinami. Poté dochází k vytvoření spojitě pórovitosti, která spojuje vnitřní části betonu s povrchem. Nejtypičtější je narušení působením vody, vzduchu, nebezpečnými ionty –  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ .

### **2.4.2 Tepelné vlastnosti betonu**

Chování materiálů, které jsou vystaveny účinkům tepla nebo mrazu, je vyjadřováno tepelnými vlastnostmi, jakožto jedné z forem energie. Existují tři formy přenosu tepla, a to vedením, prouděním a zářením. Jestliže teplo přechází z teplejšího místa na chladnější bezprostředním stykem hmotných částic, jedná se o vedení. Při proudění molekul nebo částic plynu nebo kapaliny z míst teplejších do chladnějších se jedná o proudění. Vysílá-li teplejší látka elektromagnetické záření k látce chladnější i přes vakuum hovoříme o záření. Tepelné vlastnosti charakterizují parametry tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, teplotní vodivost, tepelná jímavost, teplotní délková roztažnost a součinitel teplotní roztažnosti.

- Žáruvzdornost

Odolnost vůči teplotám nad 1000 °C, přesná hranice teploty však není ustálená.

- Hořlavost

Při dosažení jisté teploty se projevuje hořením, doutnáním nebo žhnutím. Znalost hořlavosti je důležitá pro posuzování požární odolnosti stavební konstrukce z hlediska bezpečnosti. Stavební materiály se podle hořlavosti rozdělují na nehořlavé, nesnadno hořlavé, těžce hořlavé, středně hořlavé a lehce hořlavé.

- Samozhášivost  
Schopnost látek samovolně uhasnout během několika vteřin po oddálení plamene.
- Požární odolnost  
Je odolnost konstrukcí závisající především na skladbě a rozměrech jednotlivých vrstev tvořící konstrukci.

### 2.4.3 Vlhkostní vlastnosti

Vlhkostní vlastnosti vyjadřují vztah materiálu k vodě i parám a mohou mít zásadní vliv i na další vlastnosti. Mají vliv na změnu tvaru (bobtnání), pevnost (měknutí), tepelné vlastnosti (prostup tepla) a na odolnost vůči korozi. Patří zde celá řada parametrů, jako je vlhkost, hmotnostní vlhkost, objemová vlhkost, nasákavost, navlhavost, vzlínavost, difúze a propustnost.

### 2.4.4 Elektrické a magnetické vlastnosti

Pouze v ojedinělých případech je potřeba znát elektrické a magnetické vlastnosti a to při výstavbě objektů energetických systémů, tratí s elektrickou trakcí, apod. Nejdůležitějšími vlastnostmi je elektrický odpor, měrná vodivost, permitivita a útlum elektromagnetických vln.

## 2.5 Tepelné vlastnosti materiálů

### 2.5.1 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita vyjadřuje množství tepla, které je potřebné, aby se změnila teplota soustavy o jednotku teploty. Tepelná kapacita je definovaná vztahem

$$C = \frac{dQ}{dT}, \quad (2)$$

kde  $dQ$  je teplo dodané soustavě a  $dT$  je přírůstek termodynamické teploty soustavy. Jednotkou tepelné kapacity je J/K.

#### *Molární tepelná kapacita*

Molární tepelná kapacita je vztažena na jednotku látkového množství. Jednotkou molární tepelné kapacity je J/mol/K. Je vyjádřena vztahem

$$c = \frac{C}{n} = \frac{dQ}{n dT}. \quad (3)$$

#### *Měrná tepelná kapacita*

Číselně je měrná tepelná kapacita definována jako množství tepla, které je potřebné k ohřátí jednotkového množství látky o jednotku teploty, a je vyjádřena vztahem

$$c = \frac{C}{m} = \frac{dQ}{m dT}, \quad (4)$$

Fyzikální jednotkou měrné tepelné kapacity je J/kg/K. Z definice měrné tepelné kapacity látky vyplývá kalorimetrická rovnice

$$dQ = mcdT, \quad (5)$$

kde  $dQ$  je množství předaného tepla,  $dT$  změna teploty,  $c$  je měrná tepelná kapacita a  $m$  je hmotnost látky

Měrná tepelná kapacita se vyjadřuje dvěma způsoby [15]. Pokud se měření provádí za konstantního tlaku, je měrná tepelná kapacita vyjadřována pomocí entalpie

$$c_p = \frac{dH}{m dT}. \quad (6)$$

Pokud se měření uskutečňuje za konstantního objemu, pak se měrná tepelná kapacita vyjadřuje prostřednictvím změny energie

$$c_v = \frac{dU}{m dT}. \quad (7)$$

Následující vztah odvozený z rovnice (4) je důležitý pro vyhodnocování skoku diferenciální metodou

$$c_p = \frac{P}{m} \left( \frac{dT}{dt} \right)^{-1}, \quad (8)$$

kde  $dQ = P dt$  a  $P$  je výkon zdroje tepla.

## 2.5.2 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je rovněž označována jako součinitel teplotní vodivosti. Vedení tepla obecně vyjadřuje rychlost přenosu tepla z teplejších částí tělesa do částí chladnějších, což vede k vyrovnání teplot. Tepelná vodivost je definovaná Fourierovým zákonem

$$q = -\lambda \text{grad } T, \quad (9)$$

kde  $q$  je hustota tepelného toku a  $\text{grad } T$  je gradient teploty v daném místě. Teplota klesá ve směru přenosu tepla, a proto teplotní gradient je záporný. Tepelná kapacita závisí na vlhkosti a teplotě podobně jako tepelná kapacita. Hustota tepelného toku je množství tepla, které projde plochou  $S$  za čas  $t$  a je vyjádřena vztahem

$$q = \frac{dQ}{S dT} = \frac{P}{S}, \quad (10)$$

kde  $P$  je výkon a  $S$  je plocha, kterou se šíří teplo ze zdroje. Pokud případ planárního vzorku o tloušťce  $h$  platí pro rozdíl teplot mezi oběma stěnami vztah

$$\text{grad } T = \frac{\Delta T}{h} = \frac{T_2 - T_1}{h}, \quad (11)$$

kde  $T_1 > T_2$ , může být tepelná vodivost po dosazení do vztahu (9) vyjádřena vztahem

$$\frac{P}{S} = \lambda \frac{\Delta T}{h} \rightarrow \lambda = \frac{P h}{S \Delta T}. \quad (12)$$

### 2.5.3 Teplotní vodivost

Teplotní vodivost neboli difuzivita je schopnost materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat rozdíly při neustálém vedení tepla. Difuzivita je definována poměrem tepelné vodivosti k měrnému teple vztaženému na jednotku objemu vztahem

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \quad (13)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti při ustálených tepelných poměrech,  $c$  je měrná tepelná kapacita,  $\rho$  je hustota měřeného vzorku. Úpravami vztahů (13) a (12) do vztahu (13) je získán vztah

$$a = h^2 \frac{d \ln T}{dt}, \quad (14)$$

kde  $h$  je vzdálenost teplotního čidla od zdroje tepla.

## 2.6 Metody studia tepelných vlastností

Základním matematickým aparátem měřících metod je diferenciální rovnice vedení tepla [16]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_0 \quad (15)$$

kde  $T$  je teplota,  $t$  je čas,  $q_0$  je výkon tepelného zdroje v objemové jednotce látky a  $\rho$  je hustota materiálu (objemová hmotnost). V rovnici se vyskytuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  a měrná tepelná kapacita  $c$ , které představují základní termofyzikální veličiny. Za důležitý aspekt všech známých metod považujeme znalost rozložení teplot ve vzorku. Tvar rozložení závisí zejména na tvaru a působení tepelného zdroje. Jsou rozlišovány dva typy metod:

- bezzdrojové metody
- zdrojové metody

Bezzdrojové metody jsou charakterizovány hodnotou  $q_0 = 0$ . Jsou rozdělovány na stacionární a nestacionární metody. Pokud je měření prováděno za ustáleného stavu a časová derivace teploty je rovna nule, jedná se o stacionární metody. Pokud se měření prováděno v přechodovém stavu a v případě, že časová derivace teploty není rovna nule, jde o nestacionární metody.

Zdrojové metody jsou charakterizovány hodnotou  $q_0 \neq 0$ . Tyto metody se dělí [17] :

- Podle tvaru působícího zdroje (objemový, plošný, bodový, aj.)
- Podle časového průběhu tepelného příkonu zdroje (pulzní, schodové a rampa)
- Podle tvaru měřeného vzorku (vzorky definovatelného nebo nedefinovatelného tvaru)

### 2.6.1 Transientní metody

Literatura popisuje celou řadu tranzientních metod, které se vzájemně odlišují tvarem zdroje tepla, typem pulzu a dalšími parametry. Metoda spočívá v přivedení elektrického pulzu

tepelnému zdroji, čímž se vytváří malé množství tepla. Vzniklé teplo se dodává do vzorku a následně se zaznamenává tepelná odezva přístroji prostřednictvím teplotního čidla, které je umístěno v určité vzdálenosti od zdroje tepla. Výhoda tranzientních metod spočívá v tom, že tepelná odezva vzniká uvnitř vzorku, a tedy povrch vzorku nemá vliv na měření [18].

*Tabulka 2: Transientní metody*

Metoda	Zdroj tepla	Teplotní čidlo	Parametr
Pulse transient method	plošný	mimo zdroj tepla	$\lambda, a, c$
Ramp wise method	lineární	mimo zdroj tepla	$\lambda, a, c$
Step wise method	plošný	mimo zdroj tepla	$\lambda, a, c$
Hot disc method	disk	spojeno se zdrojem tepla	$\lambda, a, c$
Hot plate method	plošný	spojen se zdrojem tepla	$\lambda$
Hot wire method	lineární	spojen se zdrojem tepla	$\lambda, a$

### **Model teplotních odezev transientních metod**

Při měření se teplotní pole vzorku díky přítomnosti rušivých vlivů deformuje, proto v praxi neexistuje ideální model měření. Rušivé vlivy mohou být určeny porovnáním ideálního modelu s reálným systémem. Pro usnadnění matematických aparátů je chybová funkce zanedbávána a přidává se parametr  $s$ , značící ztrátové složky. Pro uvedené typy transientních metod se vychází z Carlslow Jeagerova modelu

$$\Delta T = At^\alpha \exp\left(-\frac{h^2}{4at} - \frac{4at}{R^2}\right). \quad (16)$$

kde  $\alpha = s + \alpha_0 = \frac{E-D}{2} + \alpha_0$ ,  $D$  vyjadřuje zdroj tepla (bodový, lineární, plošný, objemový),

$E$  vyjadřuje dimenzi šíření tepla v prostoru a  $s_0$  vyjadřuje typ ohřevu (pulzní, skokový, rampa).

V tabulce (Tabulka 3) jsou zobrazeny typy metod s příslušejícím vzorcem pro parametr  $s$ .

*Tabulka 3: Charakterizace zdroje tepla*

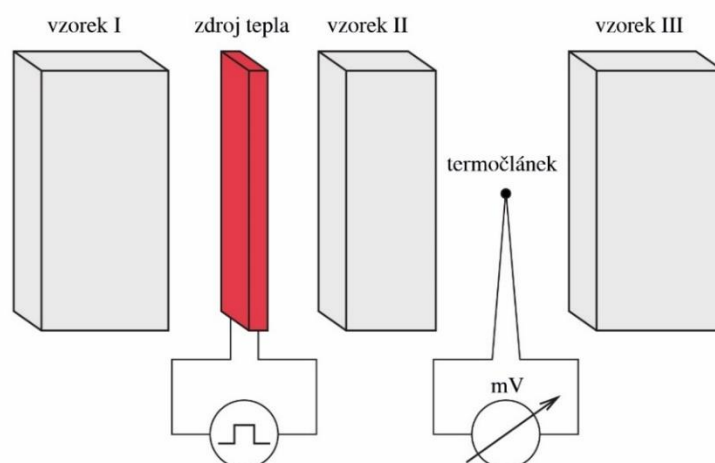
Typ ohřevu	Koeficient $\alpha_0$	Koeficient $\alpha_0$
pulz	0	$\alpha = E - D / 2$
skok	1	$\alpha = E - D + 2 / 2$
rampa	2	$\alpha = E - D + 4 / 2$

Tabulka 4: Tvary ideálních zdrojů tepla

Zdroje tepla	Rozměry zdroje tepla
bodový	$D = 0$
lineární	$D = 1$
plošný	$D = 2$
objemový	$D = 3$

Každý zdroj tepla je charakterizován jinou hodnotu daných parametrů v závislosti na tvaru zdroje a způsobu ohřevu, což zobrazuje tabulka (Tabulka 4).

#### ***Pulzní tranzientní metoda (Pulse transient method)***



Obr. 4: Princip měření pulzní tranzientní metodou

Teplotní rozsah pulzní tranzientní metody se pohybuje v hodnotách od (80–800) K. Metoda vychází z dynamického teplotního pole ve vzorku. Teplo je dodáváno tzv. Diracovým obdélníkovým pulzem ( $\mathcal{S}$  - pulzem), což je pulz o nekonečné délce a velice malé šířce. Vzorek je složen ze tří částí. Plošný zdroj tepla je uložen mezi první a druhou částí vzorku a je vyroben z materiálu se značným elektrickým odporem. Průchodem  $\mathcal{S}$  - pulzu dochází ve zdroji k uvolnění Joulova tepla

$$Q = RI^2 t_0, \quad (17)$$

kde  $R$  je elektrický odpor zdroje tepla,  $t_0$  je šířka pulzu a  $I$  je intenzita elektrického proudu [19]. Teplotní snímač zaznamenávající teplotní reakci na tepelný pulz je umístěn mezi druhou a třetí částí vzorku. Závislost teploty na čase pro pulzní ohřev je vyjádřen funkcí

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{c_p \rho} (4\pi at)^{-s} \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right), \quad (18)$$

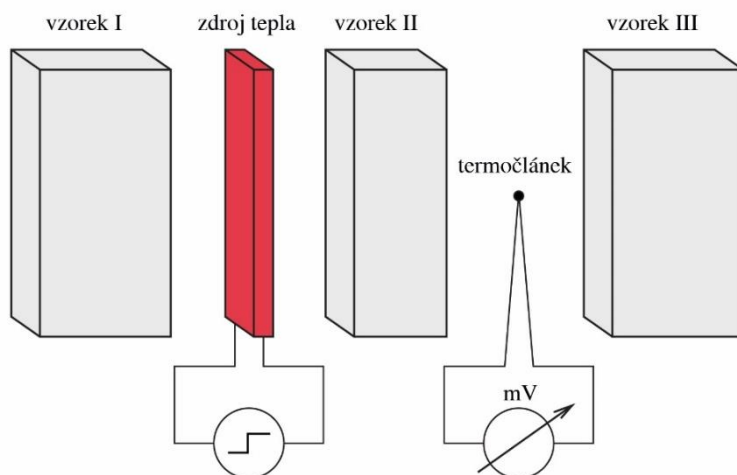


kde  $Q = P\Delta t$  je celková energie pulzu ( $P$  je výkon zdroje a  $\Delta t$  je šířka tepelného pulzu). Dále  $c$  vyjadřuje měrnou tepelnou kapacitu,  $a$  teplotní vodivost,  $t$  čas a  $\rho$  hustotu. Informace o zdroji tepla, způsobu jeho ohřevu a kvalitě tepelného zdroje udává parametr  $s$ . Pro speciální případ pulzní metody pro plošný zdroj a šíření v objemu platí, že parametr  $s = \frac{E-D}{2}$ , kde  $E = 3$  a  $D = 2$ , a proto závislost teploty na čase je vyjádřena vztahem

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{c_p \rho \sqrt{4\pi a t}} \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right). \quad (19)$$

### **Skoková metoda (Step wise method)**

Skoková tranzientní metoda je založena na vytváření stálého tepelného toku zdroje tepla, který je umístěn mezi dvěma částmi vzorku, což je zobrazeno na obrázku (Obr. 5).



Obr. 5: Princip měření pulzní tranzientní metodou

Teplo vzniká průchodem elektrického proudu plošným topným tělesem a je detekováno teplotním čidlem, které se nachází v definované vzdálenosti od zdroje tepla a měří časový průběh teplotního pole. Závislost změny teploty na čase pro planární zdroj tepla je popsána vztahem

$$\Delta T(t) = \int_0^1 \frac{P(4\pi a t)^{-s}}{c_p \rho} \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right) dt. \quad (20)$$

Úpravou integrálu metodou per partes je získán vztah

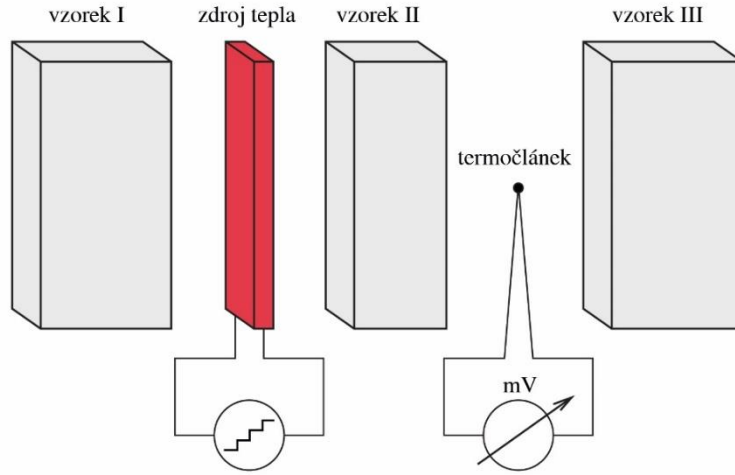
$$\Delta T(t) = \frac{P(4\pi a t)^{1-s}}{4\pi(1-s)\lambda} \left[ \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right) - \left(\frac{h^2}{4at}\right)^{1-s} \Gamma\left(s, \frac{h^2}{4at}\right) \right], \quad (21)$$

kde  $\lambda = c_p \rho$  je tepelná vodivost. Ve speciálním případě skokové metody pro plošný zdroj a šíření v objemu platí, že parametr  $s = \frac{E-D}{2}$ , kde  $E = 3$  a  $D = 2$ , a proto závislost teploty na čase je vyjádřena vztahem

$$\Delta T(t) = \frac{P}{2\lambda} \left[ \frac{\sqrt{4\pi at}}{\pi} \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right) - h \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{4at}}\right) \right], \quad (22)$$

kde  $\operatorname{erfc}(x) = \Gamma(1/2, x)/\sqrt{\pi}$  je Gaussova chybová funkce a  $x = h/\sqrt{4at}$ .

#### **Metoda rampy (Ramp wise method)**



Obr. 6: Princip měření metodou rampy

Tepelný zdroj je stejně jako u předchozích dvou metod umístěn mezi dvěma částmi vzorku, což je demonstrováno na obrázku (Obr. 6).

Průchodem elektrického proudu planárním zdrojem tepla dochází ke vzniku tepla, které je detekováno přístroji prostřednictvím teplotního čidla. Není jednoduché dosáhnout rostoucího tepelného toku a z toho důvodu je používána modifikovaná metoda rampy, při níž rostoucí tepelný tok je zprostředkován sérií skoků o definované délce a příkonu. V průběhu metody dochází k neustálému růstu referenční teploty pro následující tepelné pulzy. Závislost změny teploty na čase pro planární zdroj tepla je popsán vztahem

$$T(t) = \int_0^1 \frac{P_0 (4\pi at)^{1-s}}{4\pi(1-s)} \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right) dt. \quad (23)$$

Úpravou integrálu metodou per partes je získán vztah

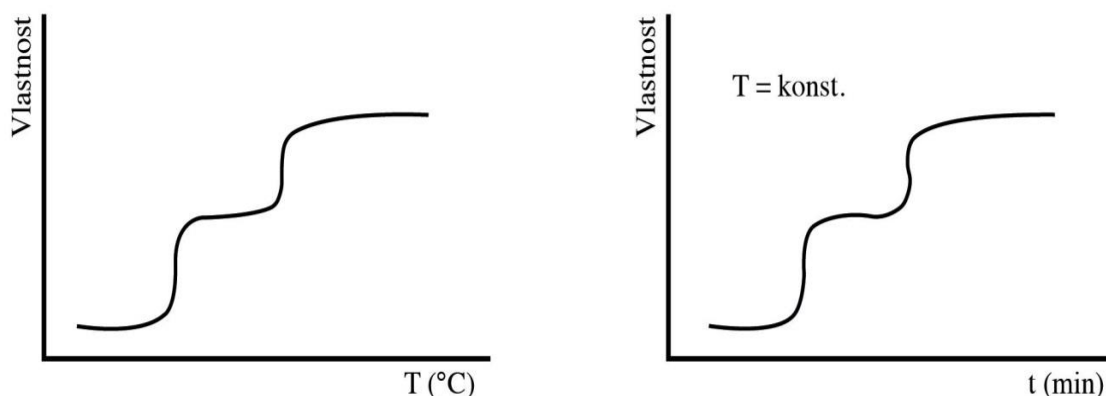
$$\Delta T(t) = \frac{P_0 (4\pi at)^{2-s}}{16\pi^2 (1-s)(2-s)\lambda a} \left[ \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right) - \left(\frac{h^2}{4at}\right)^{2-s} \Gamma\left(s-1, \frac{h^2}{4at}\right) \right]. \quad (24)$$

Pro speciální případ metody rampy pro plošný zdroj a šíření v objemu platí, že parametr  $s = \frac{E-D}{2}$ , kde  $E = 3$  a  $D = 2$ , a proto závislost teploty na čase je vyjádřena vztahem [20]

$$\Delta T(t) = \frac{P_0}{12a\lambda} \left[ \frac{(4\pi at)^{3/2}}{\pi^2} \exp\left(-\frac{h^2}{4at}\right) - h^3 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{h}{\sqrt{4at}}\right) \right]. \quad (25)$$

## 2.6.2 Termická analýza

Jde o skupinu experimentálních metod, které sledují fyzikální vlastnosti systému jako funkce teploty a času. Při analýze jsou vzorky vystaveny předem definovanému teplotnímu programu (chlazení, ohřev) v celách o konkrétních atmosférických podmínkách (inertní atmosféra nebo vzduch) a jsou zaznamenávány teplotní nebo časové změny sledovaných parametrů. Ze závislostí lze vysledovat strukturní změny (tání, krystalizaci, vypařování), mechanické vlastnosti, chemické reakce a teplotní vlastnosti (tepelná kapacita).



Obr. 7: Závislost vlastností na teplotě a času

Existuje celá řada metod. Mezi nejpoužívanější patří TG, DTA a DSC. Příslušné analýzy jsou pojmenovány podle vlastností, jejichž změna je sledována jako funkce teploty nebo času. Uvedené metody představují tzv. primární metody termické analýzy, od kterých jsou odvozeny další neboli sekundární metody termické analýzy (Evolved Gas Analysis – analýza uvolněných plynů) [22], [23].

Tabulka 5: Metody termické analýzy

Metoda termické analýzy	Pozorované vlastnosti	Zkratka
Termogravimetrická analýza	hmotnost vzorku	TG
Diferenční termická analýza	rozdíly teplot	DTA
Diferenční skenovací kalorimetrie	entalpie, Tepelný tok	DSC
Termooptometrie	optické vlastnosti	TOA
Termoakustická analýza	akustické vlastnosti	-
Termomechanická analýza	mechanické vlastnosti	TMA
Termoelektrická analýza	elektrické vlastnosti	TEA
Termomagnetická analýza	magnetické vlastnosti	-

### ***Termogravimetrická analýza***

Prostřednictvím této metody je měřena hmotnost. Při zahřívání se může hmotnost materiálu měnit dvěma způsoby. Buď dochází ke snižování hmotnosti vzorku vlivem uvolňování plynné složky, anebo pokud materiál po reakci reaguje s plynnou složkou, nastává nárůst hmotnosti. Výsledkem měření je TG křivka znázorňující změnu hmotnosti s teplotou a časem. Křivky vypovídají také o složení vzorku, tepelné stálosti a o produktech vznikajících při rozkladu. Metoda bývá zprostředkovávána na termovahách. Jedná se o obyčejné analytické váhy, na nichž je umístěn vzorek v termostatu, který je zahříván. Váhy jsou schopny velice přesně měřit v širokém rozsahu teplot. Na vahách jsou umístěny nosiče vzorků, což jsou kelímky vyrobeny nejčastěji z korundu nebo platiny. Měření probíhá v inertní nebo oxidační atmosféře. Jako inertní plyny jsou používány dusík nebo argon a jako oxidační atmosféra vzduch. Změna hmotnosti zkoumaných vzorků je zaznamenávána prostřednictvím výchylkové nebo kompenzační metody. Výchylková metoda je založena na sledování každé výchylky vah z rovnováhy. Zatímco kompenzační metoda vyrovnává vahadla tak, aby byla neustále v rovnovážné poloze.

### ***Diferenční termická analýza***

Je metoda sledující teplotní změny zkoumaného vzorku při změně teploty. Základ představují dvě vzorkovnice umístěné na termočlánu v pídce analyzátoru. V jedné vzorkovnici je zkoumaný vzorek a ve druhé teplotně inertní standard. Jako standard je nejčastěji používán oxid hlinitý, chlorid draselný, křemen a jiné. Principem metody je srovnání rozdílu teplot mezi vzorky v čase. Teplota standardu odpovídá teplotě pece, zatímco u zkoumaného vzorku dochází k exotermním reakcím (oxidace, krystalizace atd.) nebo endotermním reakcím (desolvatace, tání, rozpouštění atd.). V průběhu měření je teplota referenčního vzorku sledována předem definovaným teplotním programem, zatímco teplota zkoumaného vzorku se mění v důsledku chemických a fyzikálních změn uvnitř vzorku při plynulém lineárním ohřevu nebo ochlazování. U DTA se využívá poznatku, že v průběhu reakcí dochází k uvolňování nebo pohlcování energie, v jejichž důsledku dochází ke změně teploty vzorku. Výsledkem měření je tzv. termogram.

### ***Termooptická analýza***

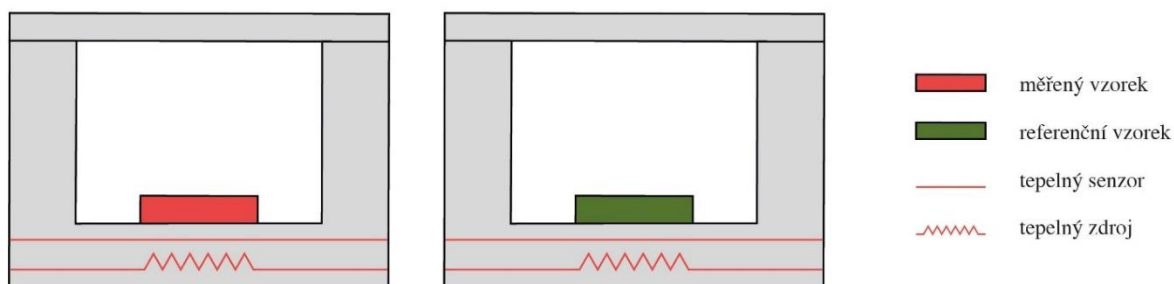
Termooptická metoda se zabývá studiem optických vlastností v závislosti na změně teploty. Při rozlišování vzájemně se překrývajících dějů bývají tyto metody nepostradatelné. Řadí se zde termomikroskopie, termofotometrie, termospektrometrie, termoregraktometrie a termoluminiscence.

### ***Diferenční skenovací kalorimetrie***

Diferenční skenovací kalorimetrie je používanější metodou termické analýzy. Zakládá se na udržení stejné teploty zkoumaného a referenčního vzorku, které jsou zahřívány pod totožným teplotním programem. Rozlišujeme diferenční skenovací kalorimetrii s kompenzovaným tepelným tokem nebo s kompenzací výkonu [21].

### ***Diferenční skenovací kalorimetrie s kompenzací příkonu***

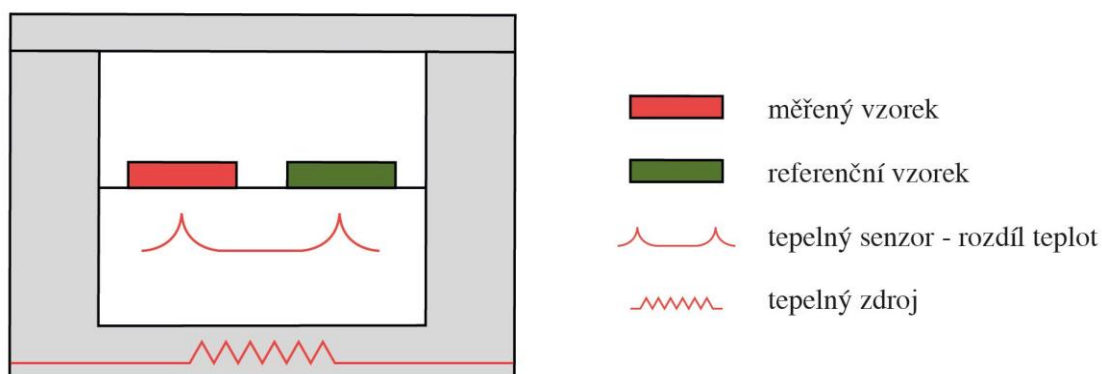
Principem „obrázené“ DTA metody je to, že obě nádoby jsou udržovány při stejné teplotě, neboli je zachován nulový teplotní rozdíl. Základ představují dvě identické cely, kdy jedna obsahuje měřený vzorek druhá referenční vzorek. Pokud u studovaného vzorku neprobíhá žádný děj, tak oba vzorky jsou podle předem nastaveného teplotního programu zahřívány stejnou rychlostí. Pokud ve studovaném vzorku proběhne endotermický děj, jeho teplota začne zaostávat oproti teplotě reference, tím dojde ke zvýšení přísunu energie studovanému vzorku a teploty jsou opět vyrovnány. Pokud probíhá exotermický děj, teplota studovaného vzorku je vyšší než teplota reference, tak v tomto případě dojde ke snížení přísunu energie. Změny, které jsou pozorovatelné u vzorku, se kompenzují změnou příkonu [21], [24].



*Obr. 7: Schéma diferenční skenovací kalorimetrie s kompenzací příkonu*

### ***Diferenční skenovací kalorimetrie s kompenzací tepelného toku***

Vzorky jsou umístěny na samostatných teplotních čidlech ve stejné cele a jsou spojeny tepelným mostem. Principem metody je, že tepelný tok je stejný do obou nádobek – jak do vzorku, tak do reference [21].



*Obr. 8: Schéma diferenční skenovací kalorimetrie s kompenzací tepelného toku*

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část je zaměřena na stanovení tepelných parametrů vysokohodnotných betonů s vláknovou výztuží. Jako studované materiály byly použity vysokohodnotné betony vyztužené vlákny (High Performance Fiber Reinforced Concrete – HPFRC) s obsahem polyvinylalkoholu (PVA), polypropylenu (PP) a ocelových vláken.

#### 3.1 Studované materiály

Studovaný vysokohodnotný beton s vláknovou výztuží byl složen z Portlandského cementu CEM II 42,5 R, křemičitého písku s maximálním zrnem 2 mm, minerálních mikrofilérů, PVA, nebo PP, ocelových vláken a z vody. Použité ocelové drátky byly rovné a pokryté mosazí. Dále byly 13 mm dlouhé, o průměru 0,2 mm a s pevností 220 MPa. Rovněž byl použit HPFRC s PVA vlákny o průměru od 0,16 do 0,24 mm, délce 12 mm a pevnosti v tahu (790–1160) MPa. Koncentrace vláken v jednotlivých vzorcích byla 0,1, 0,2 a 0,4 %. Pro snížení dávky směsové vody a dosažení optimální zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi byl přidáván superplastifikátor na bázi polykarboxylát éteru. Podrobnější složení studované směsi je uvedeno v tabulce (Tabulka 6).

Tabulka 6: Složení směsi HPFRC v  $\text{kg/m}^3$

Materiál	REF	PVA 0.1	PVA 0.2	PVA 0.4	PP 0.1	PP 0.2
CEM II 42,5 R	690	690	690	690	690	690
Křemičitý písek	1235	1235	1235	1235	1235	1235
Struska	80	80	80	80	80	80
Ocelové drátky	120	120	120	120	120	120
PVA/PP vlákna	-	1,3	2,6	5,2	1,3	2,6
Křemičitý úlet	100	100	100	100	100	100
Superplastifikátor	40	40	40	40	40	40
Voda	165	165	165	165	165	165

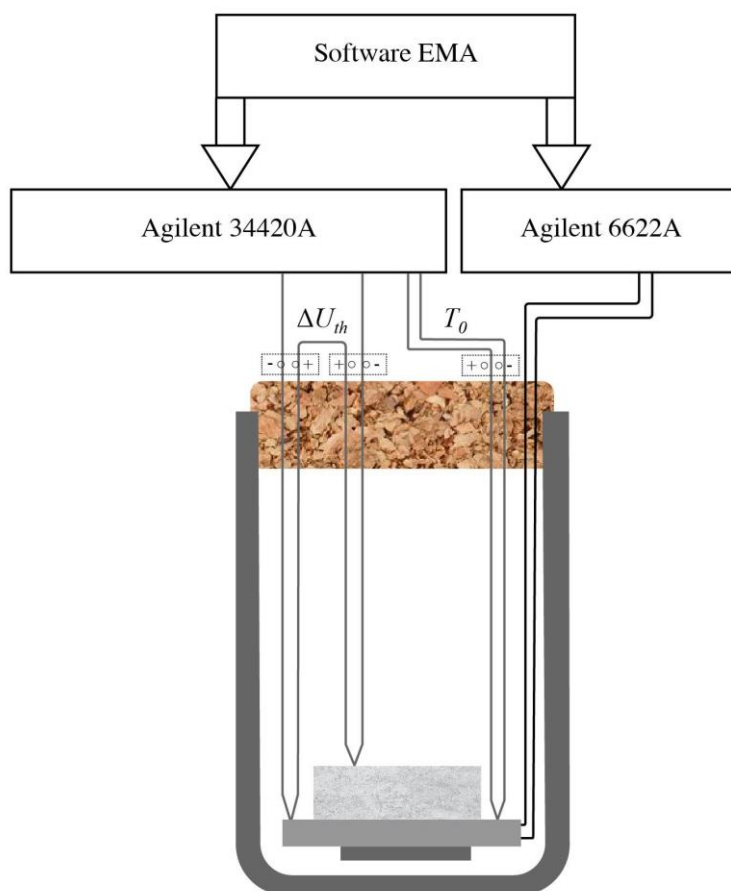
Studované vzorky měly rozměry 40 mm × 40 mm × 160 mm. Pracovali jsme celkem se šesti vzorky (REF, PP 0.1, PP 0.2, PVA 0.1, PVA 0.2, PVA 0.4). Těchto šest vzorků obsahovalo stejné množství ocelových vláken a odlišovaly se koncentrací PP a PVA vláken. Referenční vzorek obsahoval pouze ocelová vlákna. Vzorky s označením PP 0.1 a PP 0.2 obsahovaly ocelová a polypropylenová vlákna, vzorky s označením PVA 0.1, PVA 0.2 a PVA 0.4 obsahovaly ocelová a polyvinylalkoholová vlákna. Studované materiály byly označeny rovněž podle koncentrace vláken. Například vzorek PP 0.1 obsahuje 0,1 % polypropylenových vláken [25], [26].

### ***Výroba vzorků***

Vzorky byly vyrobeny na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Praze. Během prvních 24 hodin byly vzorky uloženy ve formách a udržovány v prostředí o vysoké vlhkosti (cca 98 %). Po odbednění byly vzorky po dobu 27 dnů a při teplotě 20 °C uloženy ve vodě a poté byly umístěny v laboratorních podmínkách. Po uplynutí 93 dnů byly vzorky sušeny při teplotě 105 °C, aby bylo dosaženo jejich konstantní hmotnosti. Měření probíhala v laboratořích při teplotě  $23 \pm 1$  °C a relativní vlhkosti vzduchu (25–30) %. Každý vzorek byl vyroben v sedmi sériích včetně reference. Jednotlivé série se od sebe odlišovaly teplotou temperování. Část vzorků byla ve stejný čas uložena do elektrické pece, kde byly zahřívány (temperovány) rychlostí 1 °C/min do dosažení hodnot 200, 400, 600, 800, 1000 a 1200 °C. Při těchto teplotách byly jednotlivé vzorky temperovány po dobu 2 hodin. Před zkoušením tepelných vlastností se vzorky nechaly vychladnout v laboratorních podmínkách.

### **3.2 Měřicí aparatura**

Teplotní měření se provádí za přesně definovaných podmínek. Mělo by být zabráněno tepelným ztrátám, a proto byla použita Dewarova nádoba. Jedná se o hermeticky uzavíratelné zařízení, ve kterém je udržována konstantní teplota. Dále byly použity nanovoltmetr Agilent 34420A, který sloužil k měření teploty, výkonový zdroj Agilent 36620A, který sloužil k napájení zdroje tepla, a program EMA, který sloužil k automatickému řízení experimentu.



*Obr. 9: Schéma měřicí aparatury*

### 3.2.1 Výkonový zdroj Power Supply – Agilent 6622A

K dodávání energie tepelnému zdroji jsme využili výkonový zdroj Agilent 6622A. Přístroj umožňoval nastavení teplotních pulzů do zdroje tepla. Výkon generovaného tepelného pulzu byl 4,2 W.

### 3.2.2 Nanovolt/microohmmetr – Agilent 34420A

Nanovoltmetr Agilent 34420A umožňuje připojení interních termočlánků typu K určených k měření teploty. Sériově zapojený termočlánek, je využíván k měření rozdílu termoelektrického napětí  $\Delta U_{th}$  mezi horní a spodní stranou vzorku. Měřící konec tohoto termočlánku je umístěn na horním konci vzorku a referenční konec na zdroji tepla. Druhý termočlánek je využíván k měření teploty zdroje  $T_0$ . Měření bylo provedeno prostřednictvím dvou kanálů CH1 a CH2, kde jeden kanál byl nastaven na zaznamenávání teploty a druhý na zaznamenávání termoelektrického napětí.

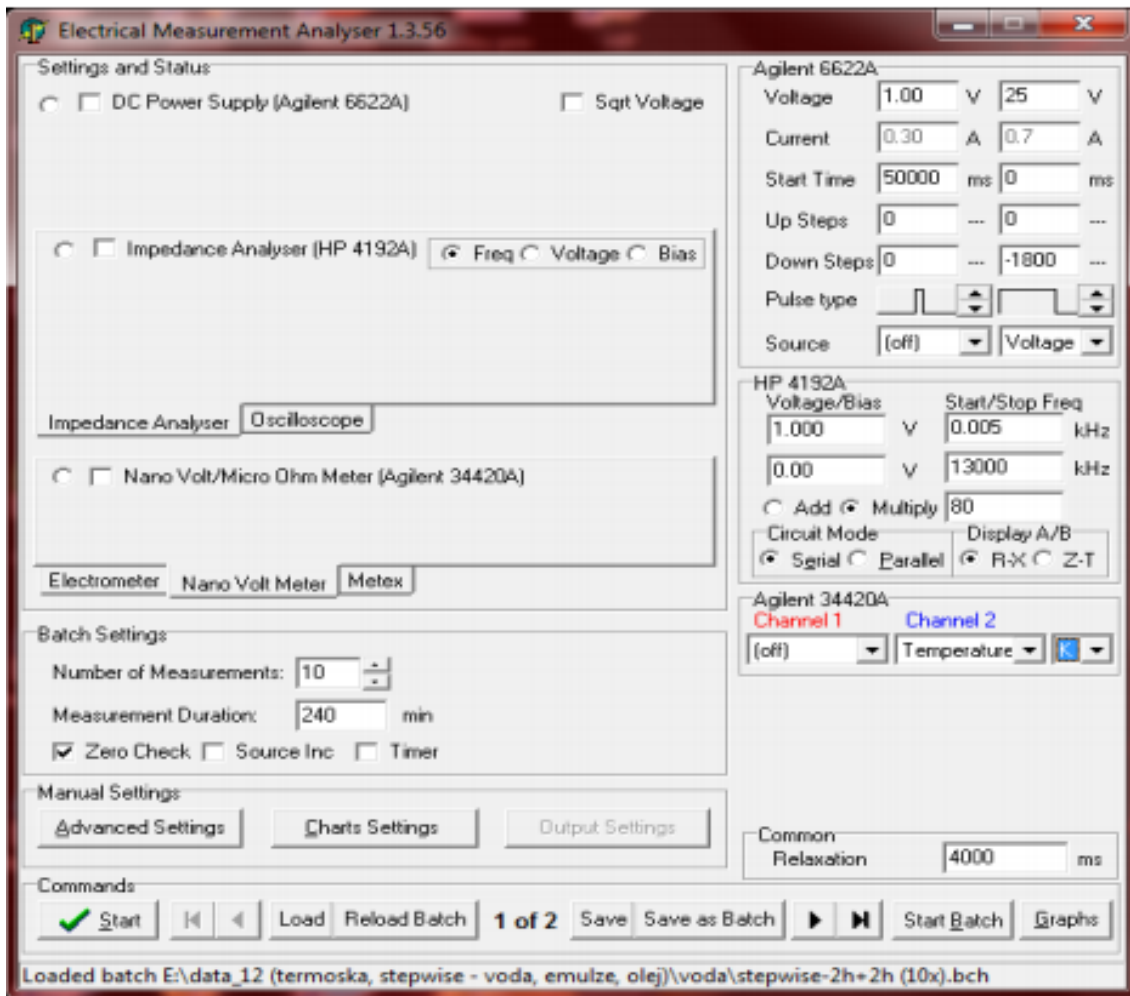
## 3.3 Charakterizace vzorků před měřením

Vzorky byly pro každé měření charakterizovány totožným způsobem. U každého vzorku byla nejprve změřena hmotnost a geometrické rozměry (plocha a tloušťka). Vzorek byl umístěn na tepelném zdroji a pro dobrý tepelný kontakt s termočlánkem byla na vzorek nanесena vodivostní pasta. Před zahájením experimentu byl vzorek ochlazen na teplotu 10 °C, poté byl vložen do Dewarovy nádoby a následně byl připojen ke kontaktům přístrojů. Vzorky byly zahřívány teplotním skokem. Doba trvání experimentu byla 22 hodin. Prvních 12 hodin probíhal ohřev a následujících 10 hodin samovolné chlazení.

### 3.3.1 Automatizované měření

K zaznamenávání naměřených dat byl využíván program EMA (Elektrical Measurement Analyser). Program umožňuje řízení přístrojů Agilent 6620A a Agilent 34420A. Prostřednictvím výkonového zdroje Power Supply byla nastavena hodnota proudu a napětí na zdroji tepla, čímž byl dodáván výkon po dobu trvání pulzu. Průchodem elektrického proudu byl zahříván rezistor, který dále předává teplo do vzorku. Nanovoltmetrem byly zaznamenávány změny teploty mezi zdrojem tepla a vzorkem. Na (Obr. 1) je demonstrováno nastavení parametrů pro skokový pulz.





Obr. 10: Demonstrační obrázek programu EMA

### 3.4 Stanovení rozdílu teplot

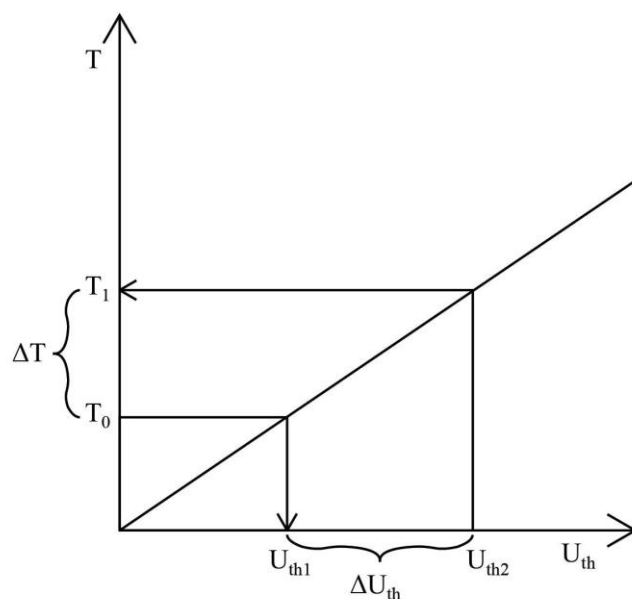
Napětí nebylo měřeno přímo, ale prostřednictvím naměřených veličin, což vyplývá z grafu (Obr. 11). Stanovení rozdílu teplot mezi horním a spodním koncem vzorku bylo provedeno pomocí kalibrační křivky pro termočlánek typu K z naměřených hodnot rozdílu termoelektrického napětí a referenční teploty

$$T_1 = (U_{th} \cdot k_1 + q). \quad (26)$$

Z kalibrační závislosti byl odvozen vztah pro přepočtení termoelektrického napětí na změnu teploty

$$T_1 = (T_0 \cdot k_2 + q_2 - \Delta U_{th}) \cdot k_1 + q_1. \quad (27)$$

Zjednodušeně do kalibrační křivky byla zanesena teplota  $T_0$ . Následně byla tato teplota přepočtena na napětí  $U_{th1}$ . Změna napětí  $\Delta U_{th}$ , zaznamenávána v průběhu měření, byla přičtena k napětí termočlánu  $U_{th1}$ , čímž bylo získáno napětí  $U_{th2}$ . Konečná tepelná odezva termočlánu  $\Delta T$  byla získána přepočtem napětí  $\Delta U_{th2}$ .



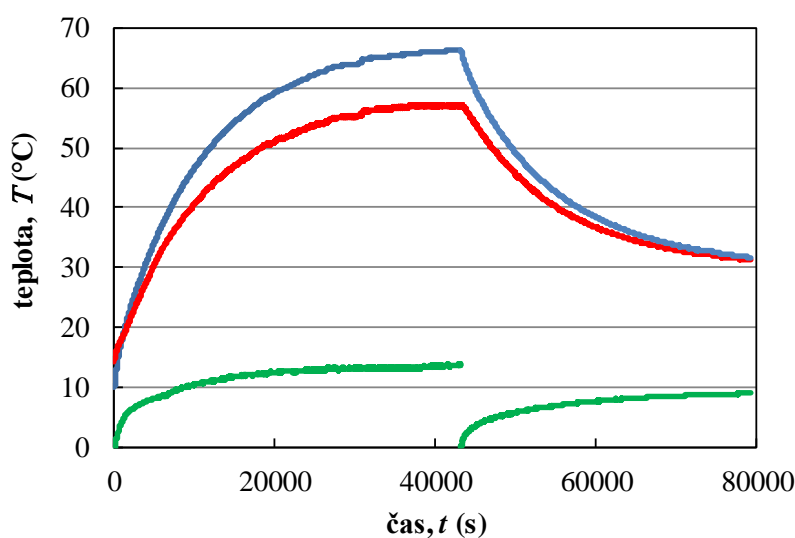
Obr. 11: Kalibrační závislost teploty na napětí termočlánu typu K

### 3.5 Výpočet parametrů pomocí diferenciální metody

Pomocí programu EMA byly získány následující parametry: čas  $t$ , proud procházející zdrojem tepla  $I$ , napětí vkládané na zdroj tepla  $U$ , dále změna termoelektrického napětí  $\Delta U_{th}$  a teplota na termočlánu  $T_0$ . Ze získaných dat byl vypočten výkon zdroje tepla  $P$  podle vztahu

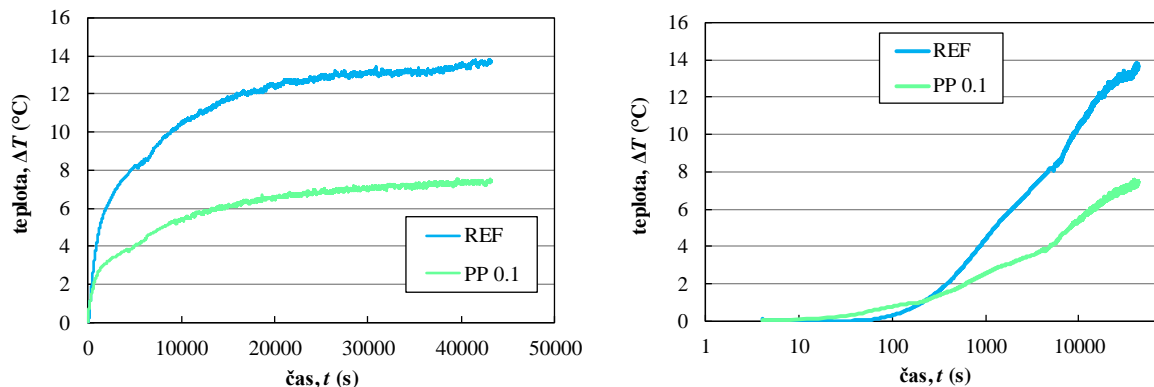
$$P = UI, \quad (28)$$

kde  $I$  je proud a  $U$  je napětí. Prostřednictvím kalibrační závislosti byla změna termoelektrického napětí  $\Delta U_{th}$  a teplota  $T_0$  přepočtena na teplotu termočlánu  $T_1$  podle vztahu (27) a následně na změnu teploty mezi horním a spodním koncem vzorku  $\Delta T$  pro kterou budou data dále vyhodnocována.



Obr. 12: Teplotní odezvy experimentálních dat při ohřevu a chlazení

Na obrázku (Obr. 12) jsou zobrazeny teplotní odezvy naměřených experimentálních dat při ohřevu i chlazení. Modrou křivkou je znázorněna teplota  $T_0$  získaná přímo pomocí termočlánku. Červenou křivkou je znázorněna teplota  $T_1$  získaná přepočtem s využitím kalibrační závislosti a zelenou křivkou je znázorněna vypočtená změna teploty  $\Delta T$ . Pro jednodušší vyhodnocování diferenciální metodou byla teplota pro klesající odezvu posunuta do nuly a zrcadlově otočena.

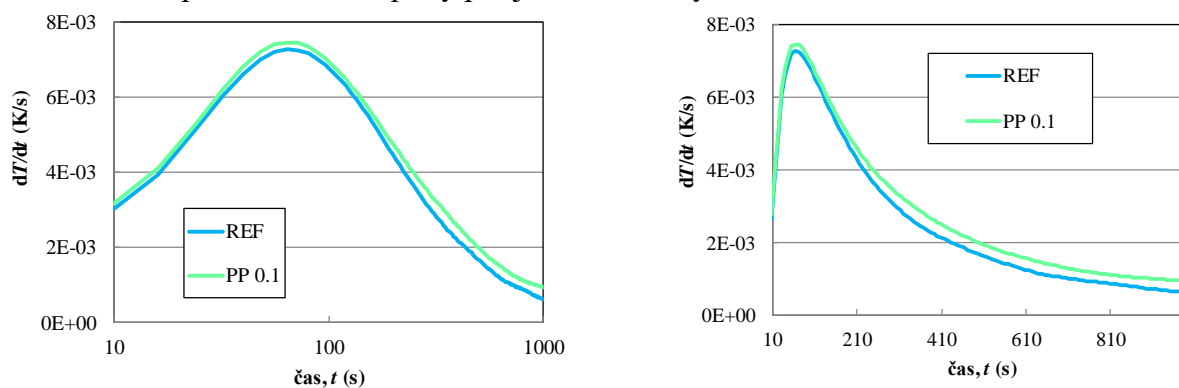


Obr. 13: Časová odezva teplotních rozdílů mezi horním a spodním povrchem vzorků zobrazeno v lineárním měřítku času (vpravo) a v logaritmickém měřítku času (vlevo)

V grafech (Obr. 13) je zobrazena závislost změny teploty  $\Delta T$  na čase  $t$  pro ohřev vzorku PP 0.1 a pro referenční vzorek. Je zřejmé, že vyšší změnu teploty dosáhl po dvanácti hodinách ohřevu vzorek bez příměsi polypropylenových vláken. Ze změny teploty  $\Delta T$  byla podle vztahu (12) vypočtena v libovolném bodě křivky tepelná konduktance, z níž byla následně stanovena tepelná vodivost pro ustálený stav podle vztahu

$$\lambda = \frac{P}{hS [\max(\Delta T_i)]}, \quad (29)$$

kde index  $i$  odpovídá změně teploty pro jednotlivé časy  $t_i$ .



Obr. 14: Závislost derivace  $dT/dt$  na čase zobrazená v lineárním měřítku (vlevo), závislost derivace  $dT/dt$  na čase zobrazená v logaritmickém měřítku (vpravo)

Dále byla provedena derivace závislosti  $dT/dt$ , která slouží ke stanovení tepelné kapacity podle vztahu (8). Z ní byla následně určena měrná tepelná kapacita pro maximální změnu derivace (v inflexním bodě) podle vztahu

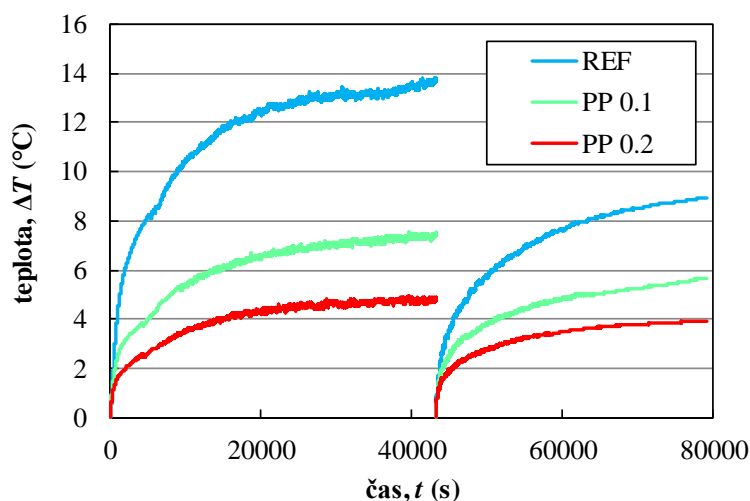
$$c = \frac{P}{4m[\max(dT_i / dt)]}, \quad (30)$$

kde index  $i$  odpovídá změně teploty pro jednotlivé časy  $t_i$ .

## 4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

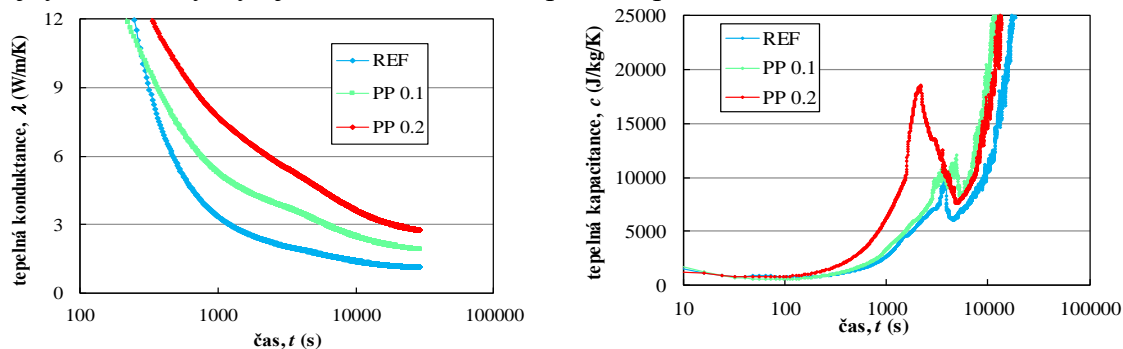
### 4.1 Tepelné vlastnosti HPFRC s obsahem vláken polypropylenů

V grafu (Obr. 15) je zobrazena závislost změny teploty na čase referenčního vzorku (modrá křivka), vzorku PP 0.1 (červená křivka) a vzorku PP 0.2 (žlutá křivka) v průběhu ohřevu i chlazení. Ze závislosti je zřejmé, že nejvyšších hodnot změny teploty v průběhu měření dosáhl referenční vzorek. Rozdílné hodnoty teplotních odchylek jsou způsobeny odlišným složením vzorků: referenční vzorek neobsahoval polypropylenová vlákna, vzorek PP 0.1 obsahoval 0,1 % polypropylenových vláken a vzorek PP 0.2 obsahoval 0,2 % polypropylenových vláken.



Obr. 15: Závislost rozdílu teploty na čase vysokohodnotných betonů

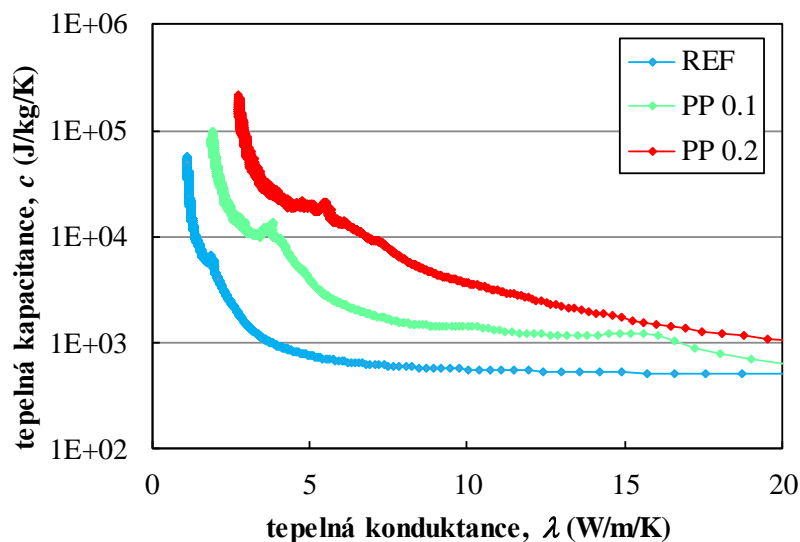
Ze závislosti tepelné konduktance na čase vyplývá, že nejnižších hodnot dosahoval referenční vzorek a naopak nejvyšších hodnot vzorek PP 0.2 obsahem 0,2 % polypropylenových vláken. Stejný trend se vyskytuje také v závislosti tepelné kapacity na čase.



Obr. 16: Závislost tepelné konduktance na čase (vpravo), závislost tepelné kapacity na čase (vlevo)

Ze závislosti tepelné kapacity na tepelné konduktanci byly prostřednictvím asymptot rovnoběžných s osami stanoveny hodnoty tepelné kapacity (průsečík s vertikální osou) a hodnoty tepelné vodivosti (průsečík s horizontální osou). Opět platí trend, že nejvyšší tepelné kapacity dosahuje vzorek PP 0.2 obsahující největší objem polypropylenových vláken. Naopak referenční vzorek, který neobsahuje polypropylenová vlákna, má nejnižší hodnotu měrné tepelné kapacity, což je potvrzeno hodnotami v tabulkách (Tabulka 7–9).

U některých vzorků je trend složitější. Může docházet ke vzniku odchylek, které jsou zobrazeny v grafu (Obr. 17). Složitost spočívá v tom, že se jedná o více fázový systém a každá ta fáze má nějakou tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu.



Obr. 17: Závislost měrné tepelné kapacity na tepelné konduktanci

Z naměřených dat byly diferenciální tranzientní metodou získány hodnoty tepelných vodivostí, měrných tepelných kapacit, teplotních vodivostí pro referenční vzorek a pro vzorky PP 0.1 o koncentraci polypropylenových vláken 0,1 % a PP 0.2 o koncentraci polypropylenových vláken 0,2 %. Jejich konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 7–9) a zobrazeny ve sloupcových grafech (Obr. 18–20). Anomální hodnoty tepelných parametrů jsou v tabulkách zvýrazněny žlutou barvou. Anomálie vznikly z důvodu nehomogenního uspořádání vláken ve vzorku a to jak ocelových tak i polypropylenových).

Tabulka 7: Tepelné parametry referenčního vzorku vysokohodnotného betonu

teplota temperování (°C)	$\Delta T$ (K)	$dT/dt$ (K/s)	$\lambda$ (W/m/K)	$c$ (J/kg/K)	$a$ (mm <sup>2</sup> /s)
0	12,89	0,0063	1,107	504,95	1,09
200	15,22	0,0078	0,862	478,42	0,94
400	6,52	0,0114	1,914	335,73	4,24
600	11,04	0,0051	1,188	754,99	0,52
800	6,96	0,0073	1,794	562,76	1,42
1000	10,02	0,0233	1,183	176,49	9,50
1200	7,49	0,0087	1,589	449,58	1,97

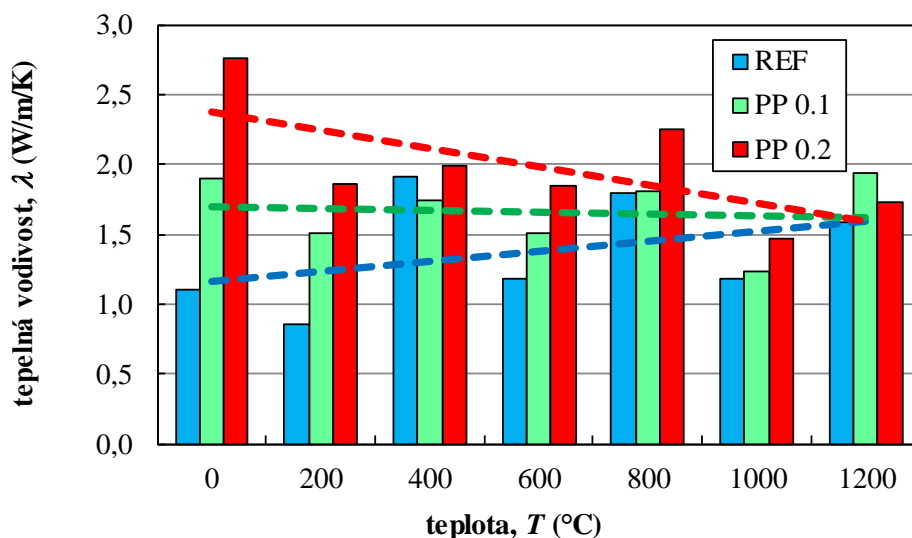
Tabulka 8: Tepelné parametry vzorku vysokohodnotného betonu PP 0.1

teplota temperování (°C)	$\Delta T$ (K)	$dT/dt$ (K/s)	$\lambda$ (W/m/K)	$c$ (J/kg/K)	$a$ (mm <sup>2</sup> /s)
0	6,92	0,0095	1,897	350,19	3,87
200	8,24	0,0075	1,515	445,83	1,91
400	7,14	0,0056	1,746	722,52	0,84
600	8,31	0,0070	1,503	545,94	1,26
800	7,23	0,0058	1,816	670,94	1,01
1000	10,16	0,0044	1,228	906,53	0,37
1200	6,45	0,0056	1,936	760,43	0,84

Tabulka 9: Tepelné parametry vzorku vysokohodnotného betonu PP 0.2

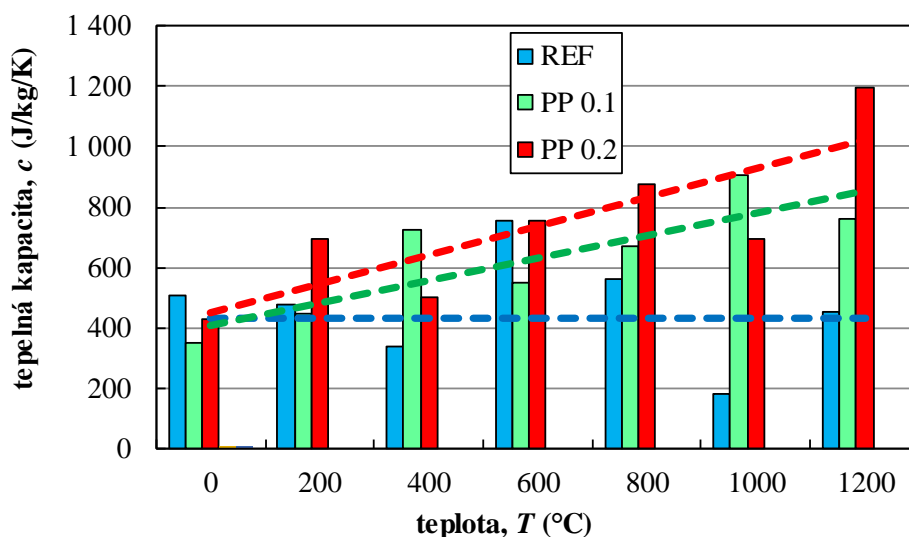
teplota temperování (°C)	$\Delta T$ (K)	$dT/dt$ (K/s)	$\lambda$ (W/m/K)	$c$ (J/kg/K)	$a$ (mm <sup>2</sup> /s)
0	4,53	0,0087	2,757	428,87	3,75
200	6,69	0,0054	1,867	693,97	0,97
400	6,25	0,0080	1,993	502,00	1,98
600	7,09	0,0051	1,852	753,96	0,81
800	5,56	0,0045	2,247	875,37	0,73
1000	8,47	0,0060	1,474	696,08	0,76
1200	6,55	0,0036	1,726	1195,48	0,30

Pro referenční vzorek a vzorky PP 0.1 a PP 0.2 byly sestrojeny sloupcové grafy. V prvním grafu (Obr. 18), je zobrazena závislost teplotní vodivosti na teplotě temperování. U většiny vzorků se tepelná vodivost zvyšuje s koncentrací příměsí. Vodivost je dána vlastnostmi materiálu, zejména obsahem ocelových a polypropylenových vláken. Obecně platí, že materiál, který obsahuje ocelová vlákna šíří tepelnou vodivost rychleji, než materiál bez obsahu vláken. Měřené vzorky jsou kompozitní materiály. Skládají se z betonu a z drátků o určité velikosti, které přispívají ke zvyšování elektrické vodivosti materiálů. Drátky jsou do směsi betonu zamíchané nerovnoměrně. Trend je tedy výrazně ovlivněn nehomogenním uspořádáním a z toho důvodu se ho nedá jednoduše vysledovat. Vzorky, které byly zahřáty na teplotu 400 °C a 1200 °C vykazují odlišné vlastnosti. U Referenčního vzorku jsou tedy anomálie při uvedených teplotách způsobeny nehomogenním rozložením ocelových drátků. U vzorků PP 0.1 a PP 0.2 se na vzniku anomálií podílejí také polypropylenová vlákna. Ke vzniku odchylek by mohlo docházet také z důvodu temperování.



Obr. 18: Graf závislosti tepelné vodivosti na teplotách temperování

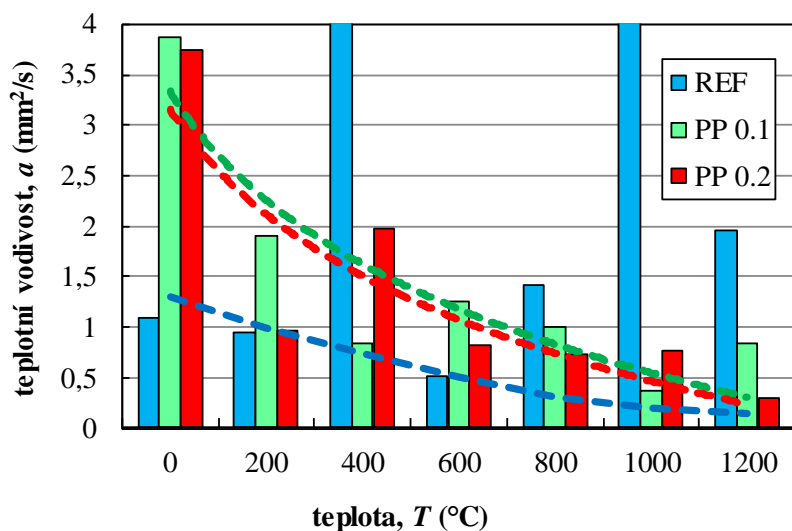
V grafu (Obr. 19) je zobrazena závislost měrné tepelné kapacity na teplotách temperování dané trojice vzorků. Trend tepelné kapacity se zvyšující teplotou temperování roste. V intervalu teplot od (0–600) °C dochází k odpařování chemicky vázané vody a jsou pozorovány nepatrné nárůsty tepelné vodivosti. Odpařováním vody dochází ke zvětšování vzdušných pórů, čím je také přispíváno ke zvyšování tepelné vodivosti. U referenčního vzorku jsou při teplotách 400 °C a 1000 °C pozorovány anomálie. Hodnoty tepelných kapacit vzorku by měly být za daných teplot vyšší. Vzniklé anomálie trendu byly způsobeny rovněž nehomogenním rozložením ocelových a polypropylenových vláken. Nejvyšších hodnot tepelné kapacity dosahuje ve většině případů vzorek PP 0.2 s koncentrací polypropylenových vláken 0,2 %.



Obr. 19: Graf závislosti měrné tepelné kapacity na teplotách temperování

V grafu (Obr. 20) je zobrazena závislost teplotní vodivosti na teplotě temperování vzorků. Z grafu je na první pohled zřejmé, že s rostoucí teplotou dochází ke snižování hodnot teplotní vodivosti všech měřených materiálů. Vzorek PP 0.1 a PP 0.2 mají podobný trend, avšak vyšších hodnot teplotních vodivostí dosahuje vzorek PP 0.2 s koncentrací vláken 0,2 %. Teplotní

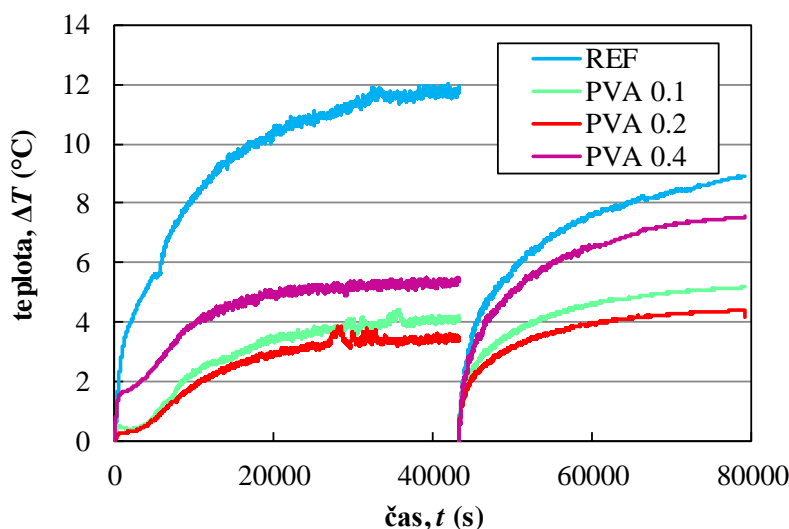
vodivost materiálu klesá s rostoucím množstvím vláken přítomných v betonové směsi. U referenčního vzorku jsou pozorovány anomálie při teplotách 400 °C a 1000 °C. Tyto odchylky vznikly opět z důvodu nehomogenního uspořádání vláken.



Obr. 20: Graf závislosti teplotní vodivosti na teplotách temperování

## 4.2 Tepelné vlastnosti HPFRC s příměsí PVA

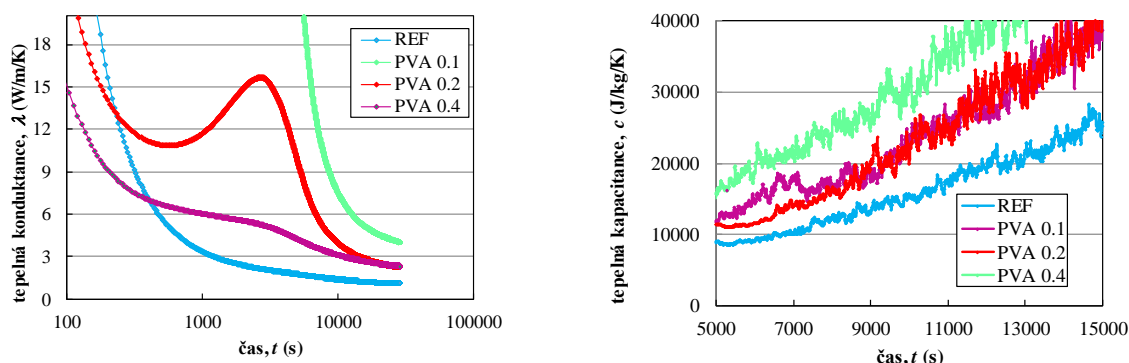
V grafu (Obr. 21) je zobrazena závislost změny teploty na čase referenčního vzorku (modrá křivka), vzorku PVA 0.1 (zelená křivka), vzorku PVA 0.2 (červená křivka) a PVA 0.4 (fialová křivka) v průběhu ohřevu i chlazení. Ze závislosti je zřejmé, že nejvyšších hodnot změny teploty v průběhu měření dosáhl referenční vzorek. Odlišné hodnoty teplot jsou zřejmě způsobeny rozdílným složením vzorků: referenční vzorek neobsahoval polyvinylalkoholová vlákna, vzorek PVA 0.1 obsahoval 0,1 % polyvinylalkoholových vláken, vzorek PVA 0.2 obsahoval 0,2 % polyvinylalkoholových vláken a vzorek PVA 0.4 obsahoval 0,4 % polyvinylalkoholových vláken.



Obr. 21: Závislost změny teploty na čase vzorků vysokohodnotného betonu

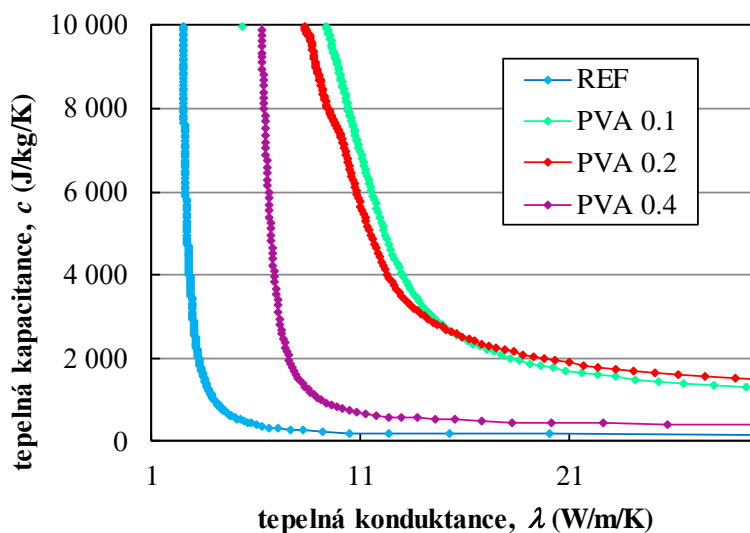


Z grafu (Obr. 22) závislosti tepelné konduktance na čase vyplývá, že nejnižších hodnot dosahoval referenční vzorek a naopak nejvyšších hodnot dosahoval vzorek PVA 0.1 s koncentrací polyvinylalkoholových vláken 0,1 %. Stejný trend se také vyskytuje v závislosti tepelné kapacity na čase.



Obr. 22: Závislost tepelné konduktance na čase (vpravo), závislost tepelné kapacity na čase (vlevo)

Z grafu (Obr. 23) závislosti tepelné kapacity na tepelné konduktanci byly prostřednictvím asymptot rovnoběžných s osami stanoveny hodnoty tepelné kapacity (průsečík s vertikální osou) a hodnoty tepelné vodivosti (průsečík s horizontální osou). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách (Tabulka 10–13). Referenční vzorek dosahuje nejnižších hodnot tepelných parametrů, naopak vzorek PVA 0.1 dosahuje nejvyšších hodnot měřených parametrů. Z grafu vyplývá, že schopnost akumulace tepla vzorků vysokohodnotného betonu roste s obsahem PVA vláken.



Obr. 23: Závislost měrné tepelné kapacity na tepelné konduktanci

Z naměřených dat byly diferenciální tranzientní metodou získány tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity, teplotní vodivosti pro referenční vzorek a vzorky PVA 0.1, PVA 0.2 a PVA 0.4. Jejich konkrétní hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách a zobrazeny v grafech (Obr. 24–20). Anomální hodnoty tepelných parametrů jsou v tabulkách zvýrazněny žlutou barvou. Anomálie vznikly opět z důvodu nehomogenního uspořádání vláken ve vzorku.

Tabulka 10: Tepelné parametry referenčního vzorku vysokohodnotného betonu

teplota slinování	$\Delta T$ (K)	$dT/dt$ (K/s)	$\lambda$ (W/m/K)	$c$ (J/kg/K)	$a$ (mm <sup>2</sup> /s)
0	12,89	0,0063	1,107	504,95	1,09
200	15,22	0,0078	0,862	478,42	0,94
400	6,52	0,0114	1,914	335,73	4,24
600	11,04	0,0051	1,188	754,99	0,52
800	6,96	0,0073	1,794	562,76	1,42
1000	10,02	0,0233	1,183	176,49	9,50
1200	7,49	0,0087	1,589	449,58	1,97

Tabulka 11: Tepelné parametry vzorku PVA 0.1

teplota slinování	$\Delta T$ (K)	$dT/dt$ (K/s)	$\lambda$ (W/m/K)	$c$ (J/kg/K)	$a$ (mm <sup>2</sup> /s)
0	3,42	0,0011	4,034	3505,60	0,08
200	4,80	0,0039	2,600	988,10	0,67
400	2,76	0,0016	4,522	2429,43	0,19
600	9,15	0,0088	1,365	437,53	1,78
800	3,71	0,0070	3,533	564,91	2,77
1000	5,82	0,0051	2,144	786,42	0,87
1200	5,06	0,0026	2,352	1559,45	0,24

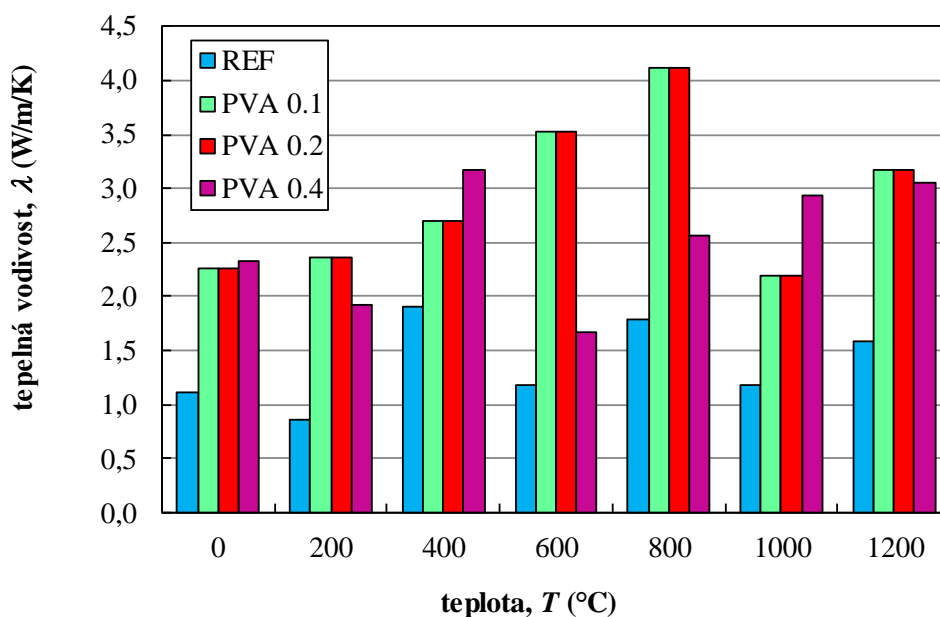
Tabulka 12: Tepelné parametry vzorku PVA 0.2

teplota slinování	$\Delta T$ (K)	$dT/dt$ (K/s)	$\lambda$ (W/m/K)	$c$ (J/kg/K)	$a$ (mm <sup>2</sup> /s)
0	5,26	0,0083	2,257	449,71	2,79
200	5,55	0,0046	2,362	822,46	0,87
400	4,62	0,0049	2,695	789,08	1,08
600	3,20	0,0010	3,533	3747,30	0,06
800	3,04	0,0012	4,113	3290,87	0,09
1000	5,40	0,0045	2,195	897,25	0,68
1200	3,76	0,0064	3,166	621,97	2,05

Tabulka 13: Tepelné parametry vzorku PVA 0.4

teplota slinování	$\Delta T$ (K)	$dT/dt$ (K/s)	$\lambda$ (W/m/K)	$c$ (J/kg/K)	$a$ (mm <sup>2</sup> /s)
0	5,49	0,0221	2,331	167,01	20,89
200	6,17	0,0057	1,923	705,69	0,97
400	3,93	0,0039	3,177	958,31	0,86
600	7,08	0,0045	1,676	836,48	0,60
800	5,11	0,0181	2,569	223,61	12,84
1000	4,04	0,0045	2,936	920,32	0,87
1200	4,08	0,0050	3,058	836,73	1,09

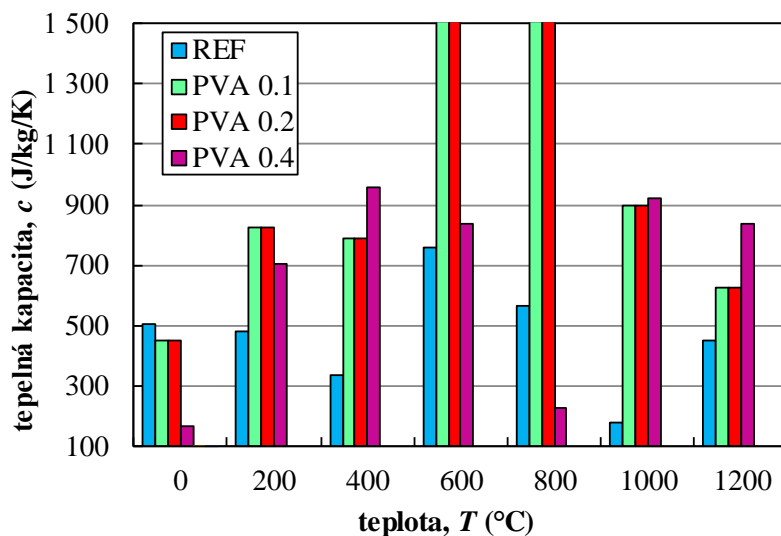
Pro referenční vzorek a sérii vzorků s obsahem polyvinylalkoholových vláken byly sestrojeny sloupcové grafy. V prvním grafu (Obr. 19), je zobrazena závislost teplotní vodivosti na teplotách temperování. Se zvyšující se koncentrací polyvinylalkoholových vláken je u většiny vzorků pozorován rostoucí trend. Z důvodu nerovnoměrného zamíchání vláken do betonu nelze opět trend jednoduše vysledovat. Vzorek, který nebyl temperován a vzorky temperované při teplotách 400 °C a 600°C vykazují anomální hodnoty. U referenčního vzorku byly tyto odchylky způsobeny nehomogenním uspořádáním ocelových drátků. U vzorků PVA 0.1, PVA 0.2 a PVA 0.4 byly způsobeny také přítomností polyvinylalkoholových vláken.



Obr. 24: Graf závislosti tepelné vodivosti na teplotách temperování

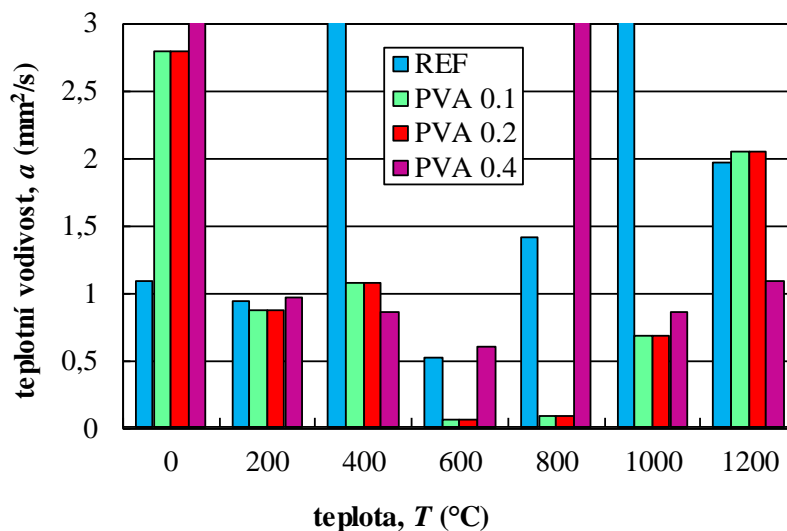
V grafu (Obr. 25) je zobrazena závislost měrné tepelné kapacity na teplotách temperování. U referenčního vzorku jsou při teplotách 400 °C a 1000 °C pozorovány anomálie. Hodnoty tepelných kapacit vzorku by měly být za daných teplot vyšší. V sérii vzorků PVA 0.1 se vyskytují anomálie u vzorku, který nebyl temperován a u vzorků, které byly temperovány při teplotě 400 °C a 1000 °C. Odchylky vznikly také u vzorku PVA 0.2 při teplotách temperování

600 °C a 800 °C. Vzniklé anomálie trendu byly způsobeny nehomogenním rozložením ocelových a polypropylenových vláken.



Obr. 25: Graf závislosti měrné tepelné kapacity na teplotách temperování

V grafu (Obr. 26) je zobrazena závislost teplotní vodivosti na teplotách temperování vzorků. U referenčního vzorku se vyskytují anomálie při teplotách temperování 400 °C a 1000 °C. U vzorku PVA 0.1 je hodnota vodivosti velice vysoká u vzorku, který nebyl temperován a při teplotách 400 °C a 1200 °C. U vzorku PVA 0.2 je hodnota teplotní vodivosti velice vysoká při teplotách temperování 600 °C a 800 °C. V sérii vzorků PVA 0.4 jsou anomálie pozorovány u vzorku, který nebyl temperován a při teplotě temperování 800 °C. Tyto odchylky vznikly opět z důvodu nehomogenního uspořádání vláken.



Obr. 26: Graf závislosti teplotní vodivosti na teplotách temperování

## 5 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá studiem tepelných vlastností vysokohodnotných betonů a možností jejich využití ve stavebním průmyslu. V teoretické části práce byla popsána výroba betonů, dále byly charakterizovány druhy betonů, tepelné parametry a také metody jejich stanovení. V experimentální části práce jsou uvedeny výsledky měření tepelných vlastností vzorků. Byly měřeny dvě skupiny vzorků s různou koncentrací polymerních příměsí. První skupina zkoumaných materiálů obsahovala polypropylenová vlákna a druhá skupina vlákna polyvinylalkoholová.

Tepelné parametry byly vyhodnocovány diferenciální metodou vyvinutou na FCH VUT. Cílem práce bylo zjistit trend změny tepelné vodivosti a tepelné kapacity na množství příměsí PP respektive PVA vláken. U vzorků s příměsí PP vláken bylo zjištěno, že tepelná kapacita se s množstvím polymerních příměsí zvětšuje, což zřejmě souvisí s tepelnou kapacitou polypropylenů. Naopak tepelná vodivost se snižuje. U vzorků s PVA vlákny je trend obdobný. Nebylo ho však možné jednoznačně prokázat zřejmě z důvodů nehomogenního rozložení, jak ocelových tak i PVA vláken.

## 6 LITERATURA

- [1] SMOLÍK, Ivan. Beton TKS - ORIENTACE NA EKOLOGII VE VÝROBNÍM PROGRAMU ČMC, A.S.: Technologie-Konstrukce-Sanace. Praha, 2001(1).
- [2] ČSN EN 206-1: Beton - část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.
- [3] PN ČMB 01-2008 Vláknobeton (FC) – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.
- [4] Vodička, J. – Veselý, V. – Krátký, J.: Specifika z technologie vláknobetonu. Beton TKS, 2010, č. 2.
- [5] SCHEINHERROVÁ, Lenka, Jan FOŘT, Zbyšek PAVLÍK a Robert ČERNÝ. Simultaneous thermal analysis and thermodilatometry of hybrid fiber reinforced UHPC. DOI: 10.1063/1.4994513. ISBN 10.1063/1.4994513. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4994513>
- [6] SCHEINHERROVÁ, Lenka a Zbyšek PAVLÍK. Thermal properties of SFR-HPC exposed to high temperatures. DOI: 10.1063/1.4994515. ISBN 10.1063/1.4994515. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4994515>
- [7] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. Stavební materiály. Brno: CERM, 1997. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [8] ROUSEKOVÁ, Ildikó. Stavebné materiály. Bratislava: Jaga group, 2000. ISBN 80-88905-21-4.
- [9] COLLEPARDI, Prof. Mario. Moderní beton. 1. Praha, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [10] Hamák L., Žigrai J., Technológia výroby betonu, Alfa Bratislava, 1977
- [11] Jelínek A., Novák V., Betonové stavitelství I, SNTL Praha, 1986
- [12] Miloň DĚDEK, Stavební materiály pro 1. Ročník SPŠ stavebních, 1. vydání SNTL 1990, ISBN 80-03-00256-7
- [13] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. 390 s. Učebnice, sv. 1. ISBN 8021416475.
- [14] AITCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Přeložil Josef KRÁTKÝ, přeložil Ivan SMOLÍK, přeložil Vlastimil BÍLEK. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost (ČBS) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.

- [15] ATKINS, P. W.: Fyzikálna chémia. 1. časť. 6. vyd. Oxford University Press / Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. 382 s. ISBN 80-227-1238-8.
- [16] Krempaský, J.: Meranie Termofyzikálnych veličín. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969. 288 s. ISBN 710,44-69.
- [17] KUBIČÁR, L.: Pulse Method of Measuring Basic Thermophysical Parameters. 1. vyd. Bratislava: VEDA, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1989. 344 s. ISBN 80-224- 0085-8.
- [18] ZMEŠKAL, O.; ŠTEFKOVÁ, P.; HŘEBENOVÁ, L.; BAŘINKA, R. Pulse Transient Method as a Tool for the Study of Thermal Properties of Solar Cell Laminating Films. INTERNATIONAL JOURNAL OF THERMOPHYSICS, 2009, roč. 30, č. 6, s.1891-1901. ISSN: 0195- 928X.
- [19] KUBIČÁR, Ľudovít, Viliam VRETENÁR, Vladimír ŠTOFANIK a Vlastimil BOHÁČ. Hot-Ball Method for Measuring Thermal Conductivity. In: International Journal of Thermophysics. 2010, 31(10), s. 1904-1918. DOI: 10.1007/s10765-008-0544-4. ISSN 0195-928x. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10765-008-0544-4>.
- [20] ZMEŠKAL, O.; REKTOŘÍK TRHLÍKOVÁ, L.; DOHNALOVÁ, L. Temperature dependence of thermal parameters of building materials. In Thermophysics 2013 - conference proceeding. FCH VUT v Brně: SAS Bratislava, VUT v Brně, 2013. s. 194-207. ISBN: 978-80-214-4801- 8.
- [21] ČÁSLAVSKÝ, Josef. Instrumentální a strukturní analýza: Přednáška - Termická analýza. FCH VUT Brno, 2017.
- [22] HATAKEYAMA, T a Zhenhai LIU. Handbook of thermal analysis. Chichester: Wiley, 1998. ISBN 0471983632.
- [23] BROWN, Michael E. Handbook of thermal analysis and calorimetry. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 1998. ISBN 044482085x.
- [24] HAINES, P. Principles of thermal analysis and calorimetry. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2002. RSC paperbacks. ISBN 0-85404-610-0.
- [25] SCHEINHERROVÁ, Lenka, Jan FOŘT, Zbyšek PAVLÍK a Robert ČERNÝ. Simultaneous thermal analysis and thermodilatometry of hybrid fiber reinforced UHPC. 2017, , 040033-. DOI: 10.1063/1.4994513. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4994513>.

- [26] SCHEINHERROVÁ, Lenka a Zbyšek PAVLÍK. Thermal properties of SFR-HPC exposed to high temperatures. 2017. DOI: 10.1063/1.4994515. ISBN 10.1063/1.4994515. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4994515>



## 7 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$a$	(m <sup>2</sup> /s)	teplotní vodivost
$\lambda$	(W/m/K)	tepelná vodivost
$C$	(J/K)	tepelná kapacita
$c$	(J/kg/K)	měrná tepelná kapacita
$c_p$	(J/kg/K)	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
$c_v$	(J/kg/K)	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu
$T$	(K)	termodynamická teplota
$I$	(A)	Proud
$U$	(V)	Napětí
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	Hustota
$P$	(W)	Výkon
$\alpha$		parametr charakterizující vlastnosti tepelného zdroje